

Departamento de Engenharia Electrotécnica

**Conversor DC-DC com busca de ponto de potência máxima  
(MPPT) para painéis solares**

**José Manuel Antunes Aniceto**

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da  
Universidade Nova de Lisboa para a obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Stanimir Valtchev

Lisboa

2010







## **Agradecimentos**

Agradeço ao meu orientador, Professor Stanimir Valtchev, pelos conselhos, sugestões e pelo apoio dado durante a realização desta dissertação.

Quero também agradecer à minha família que sempre me apoiou e incentivou durante os últimos anos, tornando possível a realização deste projecto.



# Resumo

Nesta dissertação é feito um estudo sobre o processo de conversão da energia retirada dos painéis solares fotovoltaicos em energia compatível com a rede pública de energia eléctrica. O objectivo é conseguir que os painéis fotovoltaicos funcionem sempre no ponto de potência máxima.

São apresentados alguns tipos de células fotovoltaicas, bem como várias configurações possíveis para interligar os painéis fotovoltaicos com a rede eléctrica.

São analisados diversos géneros de conversores DC/DC de forma a verificar qual o tipo de conversor que mais se adequa aos objectivos pretendidos.

É feito um estudo com base no circuito equivalente de um painel fotovoltaico e nas equações que o caracterizam. São apresentadas as curvas características de um painel fotovoltaico e a forma como essas curvas são afectadas pelos factores ambientais. Para uma melhor demonstração do comportamento do painel fotovoltaico, é efectuada uma simulação em MatLab/Simulink.

Para encontrar o ponto de potência máxima é utilizado um método de controlo Maximum power point tracker (MPPT). Neste projecto são expostos alguns métodos, assim como as suas vantagens e desvantagens. É apresentado um novo método de controlo MPPT que foi utilizado neste trabalho.

Com base no painel Bangkok Solar BS-40, foi dimensionado o sistema que permite a ligação à rede pública. Este sistema é composto por: painel fotovoltaico (PV), conversor DC-DC, algoritmo MPPT, modulador sinusoidal com transformador fly-back e ponte inversora de saída.

Finalmente, foi implementado o algoritmo MPPT com recurso a uma PIC, de forma a conseguir realizar testes e obter resultados experimentais.

**Palavras-chave:** Painéis Fotovoltaicos, Conversão de Energia, Seguidor do Ponto de Potência Máxima – MPPT, Conversor Boost.





# Abstract

In this dissertation a study is made about the process of conversion to turn photovoltaic energy into compatible energy with the electrical grid. The goal is to have photovoltaic panels to operate always at the point of maximum power.

Some types of photovoltaic cells and some options for connecting the photovoltaic panels to the electrical grid are showed.

Several types of DC / DC converters are analyzed to see what type of converter is the best to the aim proposed.

Based on the equivalent circuit of a photovoltaic panel and in the characteristic equations, are shown the characteristic curves of a photovoltaic panel, and how these curves are affected by environmental factors. For a better demonstration of the behavior of the PV panel, a simulation is performed in Matlab / Simulink.

To find the maximum power point is used a Maximum power point tracker (MPPT) control method. In this project, some methods are exposed as well its advantages and disadvantages. A new method of MPPT control, which was used in this work, is presented.

The system that allows connection to the public network has been designed based on Bangkok Solar BS-40 panel. This system comprises: photovoltaic panel (PV), DC-DC converter, MPPT algorithm, sinusoidal modulator with fly-back transformer and inverter bridge output.

Finally MPPT algorithm was implemented using a PIC, in order to be able to perform partial tests and obtain experimental results.

**Key-words:** Photovoltaic Panels, Energy Conversion, Maximum Power Point Tracker – MPPT, Boost Converter.



# Abreviaturas e Símbolos

## Abreviaturas

AC	Tensão/Corrente alternada
DC	Tensão/Corrente continua
MPPT	Maximum Power Point Tracker
PWM	Pulse Width Modulation
Wp	Watt-pico

## Símbolos

A	Ampere
$\delta$	Duty-Cycle
dB	Decibel
F	Farad
$f_c$	Frequência de corte
G	Ganho estático
H	Henry
Hz	Hertz
I	Corrente
$I_{MPPT}$	Corrente no ponto de potência máxima
$I_{CC}$	Corrente de curto-circuito
K	Constante de Boltzman ( $1,38 \times 10^{-23}$ )
M	Índice de modulação

Rad	Radianos
V	Volt
$V_{MPPT}$	Tensão no ponto de potência máxima
$V_{in}$	Tensão de entrada
$V_{out}$	Tensão de saída
$V_{CA}$	Tensão de circuito aberto
$\omega$	Frequência angular
$\Omega$	Ohm

# Índice

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>19</b>
1.1. MOTIVAÇÃO .....	20
1.2. OBJECTIVOS .....	20
1.3. CONTRIBUIÇÕES.....	21
<b>CAPÍTULO 2 - ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>23</b>
2.1 SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA .....	24
2.2. CONVERSORES DC/DC .....	28
2.2.1 Conversores DC/DC não isolados.....	29
2.2.2 Conversores DC/DC isolados.....	37
2.3 MÉTODOS MAXIMUM POWER POINT TRACKING - MPPT.....	47
2.3.1 Hill Climbing.....	47
2.3.2 Tensão Constante.....	49
2.3.3 Oscilação do Sistema .....	49
2.3.4 Correlação de Ripple .....	51
<b>CAPÍTULO 3 - PAINÉIS FOTOVOLTAICOS.....</b>	<b>53</b>
3.1 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UM PAINEL FOTOVOLTAICO .....	53
3.2 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UM PAINEL FOTOVOLTAICO .....	54
3.3 EFEITO DOS FACTORES AMBIENTAIS SOBRE A CURVA CARACTERÍSTICA DE UM PAINEL FOTOVOLTAICO .....	56
3.4 MODELAÇÃO DO PAINEL FOTOVOLTAICO EM MATLAB.....	57
3.4.1 Variação da Temperatura.....	58
3.4.2 Variação da Radiação Solar.....	60
<b>CAPÍTULO 4 - DESENVOLVIMENTO DO CONVERSOR .....</b>	<b>63</b>
4.1 SEGUIDOR DO PONTO DE POTÊNCIA MÁXIMA.....	64
4.1.1 Método MPPT Implementado.....	64
4.1.2 Dimensionamento do Conversor Boost .....	70
4.1.3 Simulação do Conversor Boost em Matlab.....	74
4.1.4 Simulação do Conversor Boost Ligado ao Painel Fotovoltaico.....	76
4.2 MODULAÇÃO SINUSOIDAL.....	79
4.2.1 Entradas de Controlo .....	80
4.2.2 Conversor Flyback.....	83
4.3 PONTE INVERSORA DE SAÍDA.....	90
<b>CAPÍTULO 5 - TESTE DO ALGORITMO MPPT DESENVOLVIDO.....</b>	<b>95</b>
CUSTOS.....	98
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES.....</b>	<b>99</b>

TRABALHOS FUTUROS .....	100
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>101</b>
<b>ANEXO - CÓDIGO DE PROGRAMAÇÃO DA PIC.....</b>	<b>105</b>

# Índice de Figuras

<b>Figura 2.1:</b> Curvas características de um painel fotovoltaico.....	24
<b>Figura 2.2:</b> Sistemas de conversão de energia: a) com conversor DC/DC e b) sem conversor DC/DC (single-stage).....	25
<b>Figura 2.3:</b> Esquemas de ligação à rede de painéis fotovoltaicos.....	26
<b>Figura 2.4:</b> Conversor step-down ou buck.....	29
<b>Figura 2.5:</b> Formas de onda da corrente e tensão do conversor buck.....	30
<b>Figura 2.6:</b> Razão de conversão ( $M(\delta)=V_o/V_s$ ) em função do duty cycle ( $\delta$ ) do conversor buck.....	31
<b>Figura 2.7:</b> Conversor step-up ou boost.....	32
<b>Figura 2.8:</b> Formas de onda da corrente e tensão do conversor boost.....	33
<b>Figura 2.9:</b> Razão de conversão ( $M(\delta)=V_o/V_s$ ) em função do duty cycle ( $\delta$ ) do conversor boost.....	33
<b>Figura 2.10:</b> Conversor step-up/down ou buck-boost.....	34
<b>Figura 2.11:</b> Formas de onda da corrente e tensão do conversor buck-boost.....	35
<b>Figura 2.12:</b> Razão de conversão ( $M(\delta)=V_o/V_s$ ) em função do duty cycle ( $\delta$ ) do conversor buck-boost.....	36
<b>Figura 2.13:</b> Conversor DC/DC Flyback.....	37
<b>Figura 2.14:</b> Formas de onda de tensão e corrente do conversor flyback a operar em modo descontínuo.....	38
<b>Figura 2.15:</b> Formas de onda de tensão e corrente do conversor flyback a operar em modo contínuo.....	39
<b>Figura 2.16:</b> Conversor DC/DC Forward.....	39
<b>Figura 2.17:</b> Formas de onda de tensão e corrente do conversor forward.....	40

<b>Figura 2.18:</b> Conversor DC/DC Push-Pull.....	41
<b>Figura 2.19:</b> Formas de onda de tensão e corrente do conversor Push-Pull.....	42
<b>Figura 2.20:</b> Conversor DC/DC Meia Ponte.....	43
<b>Figura 2.21:</b> Formas de onda de tensão e corrente do conversor em meia ponte...	44
<b>Figura 2.22:</b> Conversor DC/DC Ponte Completa.....	45
<b>Figura 2.23:</b> Formas de onda de tensão e corrente do conversor em ponte completa.....	46
<b>Figura 2.24:</b> Algoritmo MPPT Hill Climbing.....	48
<b>Figura 2.25:</b> Algoritmo MPPT Tensão Constante.....	49
<b>Figura 2.26:</b> Algoritmo MPPT Oscilação do Sistema.....	50
<b>Figura 2.27:</b> Algoritmo MPPT Correlação de Ripple.....	51
<b>Figura 3.1:</b> Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.....	53
<b>Figura 3.2:</b> Curva I-V de um painel fotovoltaico.....	55
<b>Figura 3.3:</b> Efeito da intensidade da radiação solar na curva I-V de um painel fotovoltaico.....	56
<b>Figura 3.4:</b> Efeito da variação da temperatura na curva I-V de um painel fotovoltaico.....	57
<b>Figura 3.5:</b> Modelo do painel fotovoltaico simulado em Matlab.....	58
<b>Figura 3.6:</b> Curvas I-V para diferentes temperaturas.....	59
<b>Figura 3.7:</b> Curvas P-V para diferentes temperaturas.....	59
<b>Figura 3.8:</b> Curvas I-V para diferentes radiações.....	60
<b>Figura 3.9:</b> Curvas P-V para vários valores da radiação solar.....	61
<b>Figura 4.1:</b> Diagrama de blocos do processo de conversão.....	63
<b>Figura 4.2:</b> Algoritmo MPPT Implementado.....	65



<b>Figura 4.3:</b> Curva característica do painel fotovoltaico com indicação do ripple para diferentes pontos de funcionamento.....	66
<b>Figura 4.4:</b> Topologia do filtro passa – alto activo.....	66
<b>Figura 4.5:</b> Topologia do filtro passa – baixo activo.....	68
<b>Figura 4.6:</b> Rectificador de onda completa em ponte.....	68
<b>Figura 4.7:</b> Circuito composto por um filtro passa – alto e por um rectificador de onda completa em ponte, simulado no OrCAD 16.0 Capture.....	69
<b>Figura 4.8:</b> Resultados da simulação do circuito representado na figura 4.6.....	69
<b>Figura 4.9:</b> Conversor Boost.....	70
<b>Figura 4.10:</b> Diagrama do circuito do conversor boost quando o interruptor está ligado.....	71
<b>Figura 4.11:</b> Diagrama do circuito do conversor boost quando o interruptor está desligado.....	71
<b>Figura 4.12:</b> Conversor Boost simulado em Matlab.....	74
<b>Figura 4.13:</b> Resultado da simulação para $V_{in} = 30V$ e $\delta = 0,7$ .....	75
<b>Figura 4.14:</b> Resultado da simulação para $V_{in} = 40V$ e $\delta = 0,6$ .....	75
<b>Figura 4.15:</b> Resultado da simulação para $V_{in} = 50V$ e $\delta = 0,5$ .....	76
<b>Figura 4.16:</b> Modelo do painel fotovoltaico ligado ao conversor boost.....	77
<b>Figura 4.17:</b> Tensão (em baixo) e corrente (em cima) à saída do painel fotovoltaico.....	77
<b>Figura 4.18:</b> Tensão à entrada (em cima) e à saída (em baixo) do conversor boost.....	78
<b>Figura 4.19:</b> Diagrama de blocos internos do circuito UC2854A/B.....	79
<b>Figura 4.20:</b> Circuito rectificador de onda completa com transformador.....	80
<b>Figura 4.21:</b> Simulação do circuito rectificador.....	81

<b>Figura 4.22:</b> Conversor Flyback.....	83
<b>Figura 4.23:</b> Circuito utilizado na simulação do conversor Flyback.....	88
<b>Figura 4.24:</b> Resultados da simulação do conversor Flyback.....	89
<b>Figura 4.25:</b> Ponte Inversora de saída.....	90
<b>Figura 4.26:</b> Circuito de controlo da ponte inversora.....	91
<b>Figura 4.27:</b> Simulação do circuito de controlo da ponte inversora.....	92
<b>Figura 4.28:</b> Simulação da ponte inversora de saída.....	92
<b>Figura 5.1:</b> Montagem efectuada para teste do algoritmo MPPT.....	95
<b>Figura 5.2:</b> Visualização no osciloscópio do duty-cycle depois de aumentado.....	97
<b>Figura 5.3:</b> Visualização no osciloscópio do duty-cycle depois de reduzido.....	98

# Capítulo 1 - Introdução

---

O Homem iniciou a busca por fontes de energia há muitos milhares de anos atrás. Desde o domínio do fogo, que o Homem tem vindo a investigar e descobrir novas formas de energia de maneira a ter uma vida com mais bem-estar e conforto. As fontes de energia são dos aspectos mais importantes para a evolução e sobrevivência do Homem, contudo a utilização de muitas dessas fontes de energia, principalmente os combustíveis fósseis, tem tido um impacto negativo no meio ambiente. Assim sendo, na actualidade, é feita uma pesquisa constante com o objectivo de conseguir desenvolver as técnicas de obtenção de energia, de forma a gerar uma energia de baixo custo e minimizar o impacto negativo no meio ambiente.

O aperfeiçoamento da utilização das energias renováveis tem como objectivo diminuir a dependência dos combustíveis fósseis e assim reduzir o impacto negativo que a utilização dessas energias tem no meio ambiente. A principal fonte de energia do nosso planeta é o Sol, fornecendo anualmente  $1,5 \times 10^{18}$  kWh à Terra. É também uma fonte de energia inesgotável.

A energia eléctrica pode ser transportada por longas distâncias e abastecer vários pontos ao mesmo tempo, sendo posteriormente convertida nas mais variadas formas de energia (mecânica, luminosa, térmica, química) de acordo com as necessidades.

A transformação directa de energia solar em energia eléctrica actualmente está baseada no efeito fotovoltaico. De forma muito resumida, o efeito fotovoltaico, é o aparecimento de uma diferença de potencial, numa estrutura de um material semicondutor, gerada pela absorção de luz. Célula Fotovoltaica é o nome que se dá a essas estruturas de material semicondutor.

As células fotovoltaicas são as unidades básicas na geração de energia. Várias células fotovoltaicas ligadas entre si formam os painéis fotovoltaicos. No entanto este género de geradores eléctricos possui uma desvantagem que é a seu rendimento energético e além disso o custo também é elevado. O rendimento que

ronda no máximo 15%, associado ao custo, faz com que seja um investimento com retorno a longo prazo e assim pouco atractivo.

Contudo este tipo de geração de energia possui muitas vantagens: pouca necessidade de manutenção, não polui, reduzidas perdas de transmissão devido à proximidade entre a geração e consumo, são fontes silenciosas.

## **1.1. Motivação**

O aumento dos níveis de poluição e a redução das reservas de petróleo, principal fonte de energia a nível mundial, tem levado à procura de fontes de energia alternativas. As energias renováveis têm a particularidade de serem inesgotáveis ao mesmo tempo que têm um impacto reduzido no ambiente.

A energia fotovoltaica, sendo uma fonte de energia renovável, tem vindo a desenvolver-se ao longo dos últimos anos. No entanto o rendimento dos painéis fotovoltaicos é relativamente baixo, o que torna imprescindível a existência de um método de procura do ponto de potência máxima (MPPT). O MPPT possibilita que o painel fotovoltaico consiga funcionar sempre no ponto de potência máxima, permitindo assim optimizar o funcionamento do painel.

## **1.2. Objectivos**

Com esta dissertação pretende-se projectar um conversor que consiga extrair do painel solar a potência máxima. Deste modo deve existir um seguidor que procura o ponto de funcionamento do painel onde o produto da corrente pela tensão ( $I \times V$ ) tem o seu máximo. Finalmente, a energia extraída do painel deve ser fornecida directamente à rede eléctrica.

### **1.3. Contribuições**

Esta dissertação apresenta um novo algoritmo maximum power point tracker (MPPT) que necessita apenas dos valores instantâneos da corrente e tensão para procurar o ponto de potência máxima de funcionamento de um painel fotovoltaico. Este método como necessita apenas dos valores instantâneos, possui um tempo de resposta inferior quando comparado com outros métodos MPPT.



## Capítulo 2 - Estado da Arte

---

As fontes de energia renovável têm cada vez mais importância no total de energia consumida no mundo. A independência dos combustíveis fósseis e nucleares, faz com que as energias renováveis sejam uma aposta segura para o futuro pois provêm de fontes inesgotáveis.

A energia fotovoltaica tem uma contribuição muito pequena, no total de energia produzida no mundo, quando comparada com outras fontes de energia renováveis, contudo com a diminuição do preço este é um dos sistemas com maior crescimento em todo o planeta. A manter-se assim, a luz solar será uma das mais importantes fontes de energia no futuro. Contudo é necessário aumentar o rendimento e a confiança nestes sistemas ao mesmo tempo que se diminui o preço de fabrico. Os actuais painéis fotovoltaicos têm um rendimento relativamente baixo (no máximo a rondar os 15%), o que associado ao seu elevado custo de fabrico, os torna num investimento pouco apetecível face a outros tipos de geradores [29,30].

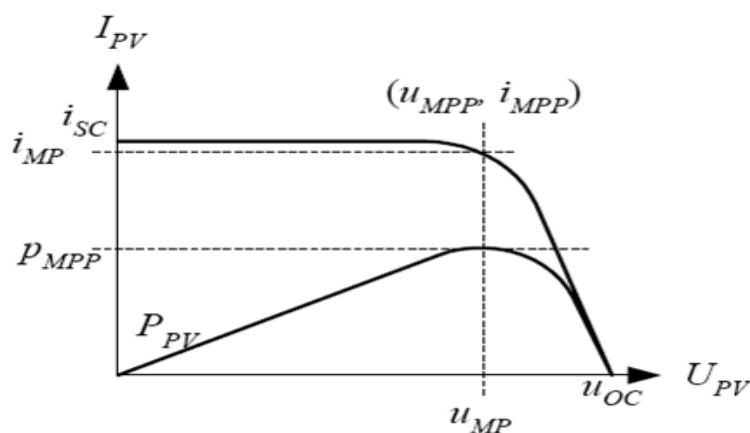
Nos últimos anos têm-se feito vários melhoramentos a nível da conversão da energia fotovoltaica em energia eléctrica, dando-se mais ênfase neste trabalho aos conversores DC/DC e algoritmos de busca do ponto de potência máxima (MPPT).

## 2.1 Sistemas de Conversão de Energia Fotovoltaica

O efeito fotovoltaico é a forma através da qual as células fotovoltaicas convertem directamente a energia solar em electricidade. São três os tipos principais de células fotovoltaicas [31]:

- *Células mono-cristalinas*: Pertencem à primeira geração de células fotovoltaicas. Têm um rendimento relativamente alto, por volta de 16%, podendo atingir 23% em laboratório. No entanto apresentam um elevado custo e complexidade de produção. Necessitam de grande quantidade de energia no seu fabrico.
- *Células poli-cristalinas*: Precisam de menos quantidade de energia no fabrico, logo têm um custo de produção menor. Porém apresentam um menor rendimento eléctrico (entre 11% e 13%, conseguindo em laboratório até 18%).
- *Células de silício amorfo*: Apresentam o menor custo de produção, no entanto o seu rendimento eléctrico é também o menor (entre 8% a 10% ou 13% em laboratório).

Cada célula produz apenas uma reduzida potência eléctrica, logo as células são interligadas formando um painel (ou modulo) fotovoltaico. Na figura 2.1 podem-se observar as curvas características da corrente ( $I_{pv}$ ) e da potência ( $P_{pv}$ ) em relação à variação da tensão ( $V_{pv}$ ).



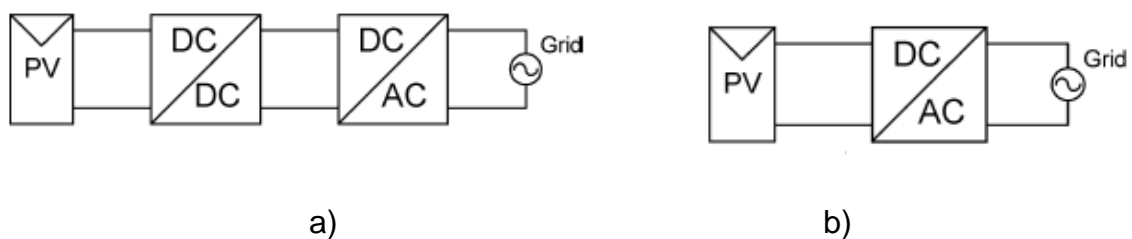
**Figura 2.1:** Curvas características de um painel fotovoltaico [30]



Como se pode observar figura 2.1, a corrente  $i_{sc}$  é a corrente de curto-circuito que representa a corrente que o painel debita em determinadas condições com tensão nula. A tensão  $u_{oc}$  é a tensão de circuito aberto que ocorre sob determinadas condições quando a corrente é nula. O ideal é que o painel funcione no ponto de potência máxima ( $u_{MPP}$ ,  $i_{MPP}$ ), e de esta forma fornecer o máximo de potência à rede. Neste ponto o produto da tensão pela corrente é máximo. Os valores  $i_{MP}$  e  $u_{MP}$  correspondem aos pontos de corrente e tensão nominais do dispositivo e são relativos ao ponto de máxima potência.

A corrente e a tensão DC fornecidas pelo painel fotovoltaico necessitam ser convertidas para que possam ser injectadas na rede eléctrica. Deste modo é imprescindível existir um sistema de conversão DC-AC que torne possível a ligação à rede.

A utilização de conversores DC-DC depende da configuração da ligação dos painéis fotovoltaicos com a rede eléctrica, sendo mais comum a ligação de vários painéis em série. Caso o valor da tensão DC fornecida pelos painéis seja superior ao valor de pico da tensão AC da rede eléctrica, não é necessário a utilização de um andar com conversor elevador (boost) DC/DC. Na figura 2.2 são apresentados dois sistemas de conversão.

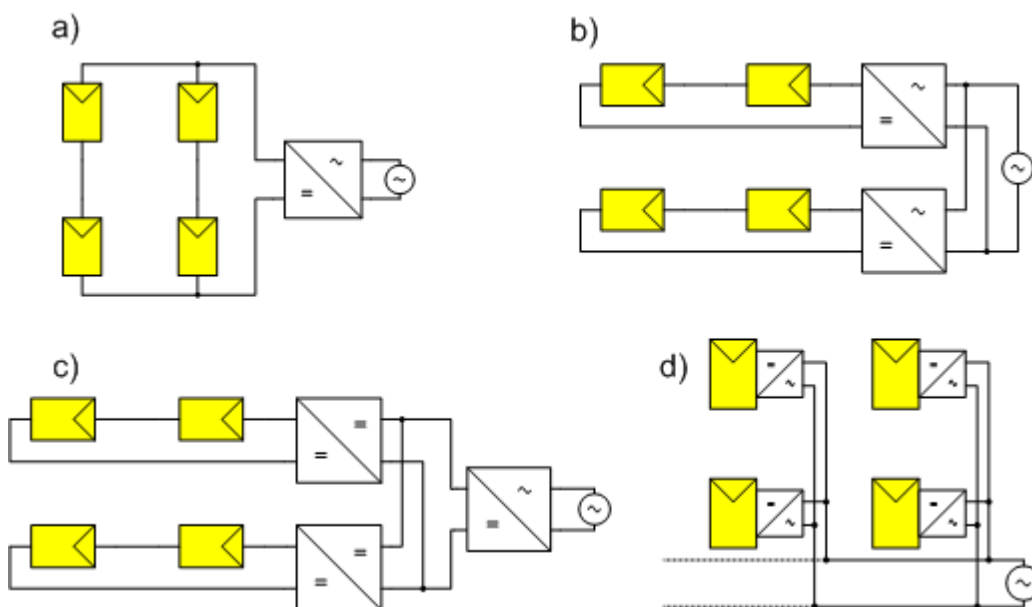


**Figura 2.2:** Sistemas de conversão de energia: a) com conversor DC/DC e b) sem conversor DC/DC (single-stage) [11]

O primeiro bloco (conversor DC/DC) serve para elevar o nível de tensão fornecida pelo painel fotovoltaico e para buscar o ponto de potência máxima, utilizando para isso um sistema MPPT. O conversor DC/AC tem como função modular a tensão de

modo a obter uma onda de tensão sinusoidal com a frequência de 50Hz, sendo assim possível transferir a energia para a rede eléctrica.

Existem várias configurações possíveis para interligar os painéis fotovoltaicos com a rede eléctrica. Essas configurações têm sofrido alterações ao longo dos anos, de forma a garantir uma melhor eficácia e uma diminuição no número de componentes necessários, garantindo assim uma diminuição do custo de investimento neste tipo de sistemas de conversão de energia [22]. As configurações mais frequentes de ligação de painéis fotovoltaicos à rede eléctrica são apresentadas na figura 2.3.



**Figura 2.3:** Esquemas de ligação à rede de painéis fotovoltaicos [22]

No esquema a) da figura 2.3 está representado o esquema conhecido como centralizado, que muitas vezes é descrito como o passado dos sistemas de conversão fotovoltaica. É utilizado para aplicações de potência elevada, apresentando um elevado nível de rendimento, simplicidade e um baixo custo devido à utilização de apenas um conversor. Porém, esta configuração tem a desvantagem de ocupar uma grande área, composta por uma matriz de painéis fotovoltaicos ligados a apenas um conversor DC/AC. Assim é impossível otimizar cada painel individualmente e por conseguinte obtêm-se um menor rendimento no sistema geral.

Outra das desvantagens é que no caso de o conversor falhar, todo o sistema pára de fornecer energia à rede [22, 30].

No esquema b) da figura 2.3 está o esquema conhecido por *string*, que é utilizado para aplicações menores, como por exemplo o telhado de uma casa de habitação. A cada conjunto de painéis fotovoltaicos ligados em série está ligado um conversor DC/AC, ou seja, todos os conjuntos de painéis são independentes entre si. Permitindo assim que cada conjunto de painéis possua o seu próprio sistema MPPT. Desta forma caso falhe algum conversor, apenas os painéis fotovoltaicos associados a esse conversor ficarão inoperacionais. Esta configuração tem como desvantagem o custo mais elevado, devido à utilização de vários conversores DC/AC [30].

Denomina-se *multi-string* o esquema representado na figura 2.3 c), sendo considerado o futuro dos sistemas fotovoltaicos. Nesta configuração cada conjunto de painéis fotovoltaicos está ligado a um conversor DC/DC, que realiza o controlo MPPT. Os conversores estão depois ligados a um único conversor DC/AC. Desta forma consegue-se otimizar o rendimento de cada conjunto de painéis fotovoltaicos, ao mesmo tempo que se reduz o custo devido ao facto de se utilizar apenas um conversor DC/AC [22, 30].

No esquema d) da figura 2.3 está representado o esquema denominado modular, em que a principal característica é a ligação de um conversor por cada painel fotovoltaico. Este esquema permite otimizar cada painel individualmente, sendo mais eficiente que a configuração *string* e também mais dispendioso a nível de investimento inicial e manutenção [30]. Porém tem como vantagem a utilização dos painéis fotovoltaicos de forma semelhante a um dispositivo “plug and play”, sem necessidade de muitos conhecimentos sobre sistemas fotovoltaicos [22, 11].

## 2.2. Conversores DC/DC

Os conversores DC-DC são sistemas normalmente utilizados para fornecer uma tensão contínua regulada a partir de uma fonte de tensão contínua não regulada. Geralmente são compostos por transístores e por elementos passivos: diodos, bobinas, condensadores e resistores. Estes conversores são controlados através de PWM, sendo o duty-cycle a principal característica que controla o valor da tensão na saída [15].

Os conversores DC-DC podem funcionar em três modos diferentes, o modo de funcionamento contínuo (regime não lacunar), o modo de funcionamento descontínuo (regime lacunar) e o modo de funcionamento crítico. O modo de funcionamento está relacionado com a corrente na bobina,  $I_L$ . Se esta corrente nunca for nula, o conversor está a trabalhar no modo de funcionamento contínuo, mas no caso da corrente na bobina atingir o valor zero o conversor funciona em modo descontínuo. O modo de funcionamento crítico ocorre quando a corrente na bobina atinge o valor zero no preciso momento em que termina o período de comutação.

Estes conversores podem ser divididos em dois grupos [15]:

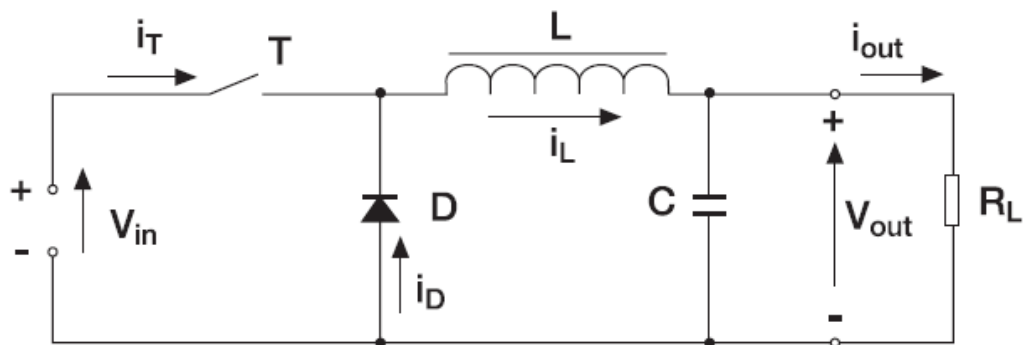
- **Conversores não isolados:** step-down ou buck, step-up ou boost e step-up/down ou buck-boost.
- **Conversores isolados:** flyback, forward, push-pull, meia ponte e ponte completa.

Os conversores isolados denominam-se desta forma pois possuem um transformador no seu circuito que isola a saída da entrada.

## 2.2.1 Conversores DC/DC não isolados

### Conversor step-down ou buck

Este conversor gera à sua saída uma tensão DC igual ou inferior à tensão de entrada. Na figura 2.4 pode ser visto o esquema eléctrico deste tipo de conversor.



**Figura 2.4:** Conversor step-down ou buck [15]

Basicamente este conversor assenta o seu funcionamento no armazenamento e descarga de energia na bobina  $L$ , comportamento este que é controlado através do duty cycle do sinal PWM aplicado no transístor (interruptor). O funcionamento deste conversor está dividido em duas etapas:

**1ª Etapa** – Ocorre quando o transístor está a conduzir. A corrente circula pela bobina  $L$  e pela carga (saída). Durante esta etapa a bobina  $L$  é magnetizada e é fornecida energia para a saída.

**2ª Etapa** – Nesta etapa o interruptor está aberto, ou seja, o transístor não está a conduzir. Durante esta etapa o diodo começa a conduzir e a bobina é desmagnetizada, transferindo a sua energia para a carga.

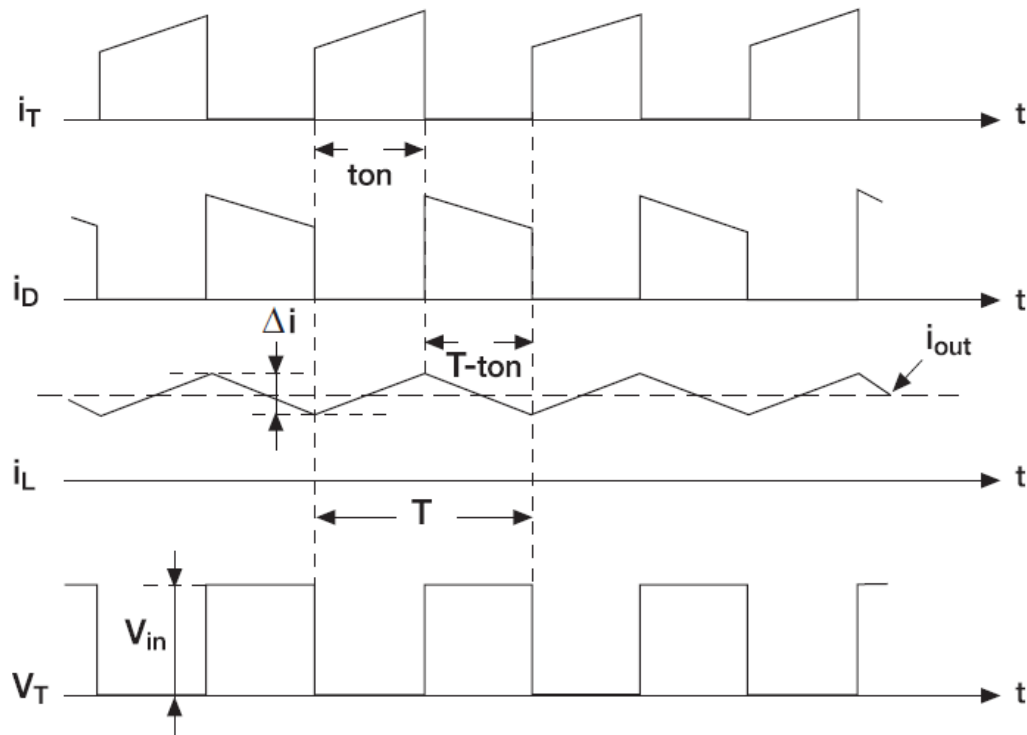
Pela análise do circuito chega-se à conclusão que a relação entre a tensão de entrada ( $V_{in}$ ), a tensão de saída ( $V_{out}$ ) e o *duty cycle* ( $\delta$ ) é a seguinte:

$$(V_{in} - V_{out}) \cdot \delta \cdot T = -V_{out}(1 - \delta) \cdot T \quad (2.1)$$

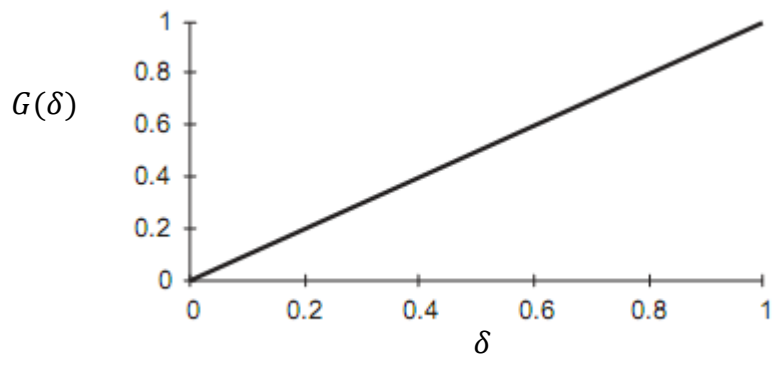
E por conseguinte o ganho estático, para regime não lacunar [9]:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \delta \quad (2.2)$$

Como  $\delta$  assume valores entre 0 e 1, pode-se concluir que  $V_{in} \geq V_{out}$ , verificando-se assim o propósito deste conversor, isto é, apresentar à saída uma tensão inferior à da entrada.



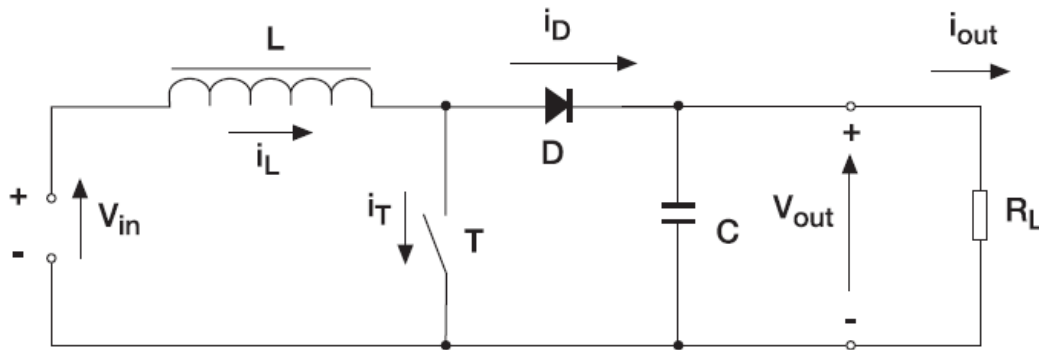
**Figura 2.5:** Formas de onda da corrente e tensão do conversor buck para regime não lacunar [15]



**Figura 2.6:** Ganho estático ( $G(\delta) = V_{\text{out}}/V_{\text{in}}$ ) em função do duty cycle ( $\delta$ ) do conversor buck

## Conversor step-up ou boost

Este conversor gera à sua saída uma tensão DC igual ou superior à tensão de entrada. Na figura 2.7 pode ser visto o esquema eléctrico deste tipo de conversor.



**Figura 2.7:** Conversor step-up ou boost [15]

Como acontece com o conversor anterior, este conversor assenta o seu funcionamento no armazenamento e descarga de energia na bobina  $L$ , comportamento este que é controlado através do duty cycle do sinal PWM aplicado no transístor (interruptor). O funcionamento deste conversor está também dividido em duas etapas [9]:

**1ª Etapa** – Ocorre quando o transístor está a conduzir. A corrente circula pela bobina, sendo durante esta etapa que a bobina  $L$  é magnetizada.

**2ª Etapa** – Nesta etapa o interruptor está aberto, ou seja, o transístor não está a conduzir. Durante esta etapa o diodo começa a conduzir e a bobina é desmagnetizada. A fonte ( $V_{in}$ ) e a bobina fornecem energia para a carga, ou seja a tensão na saída aumenta.

Através da observação do circuito, pode-se dizer que a equação que o representa é a seguinte:

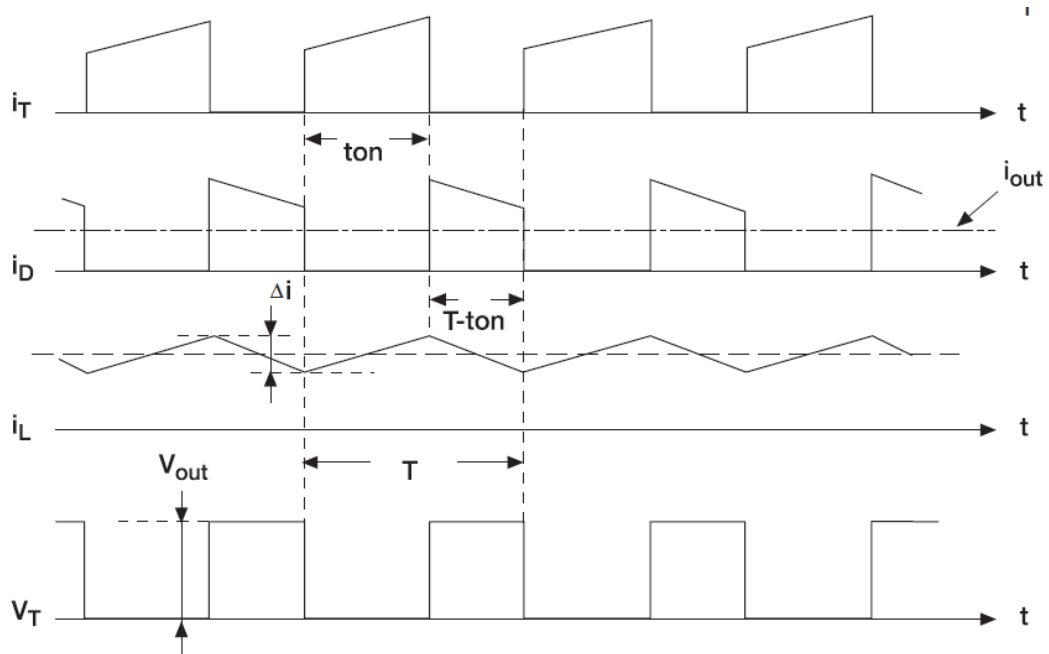
$$V_{in} \cdot \delta \cdot T = (V_{out} - V_{in})(1 - \delta) \cdot T \quad (2.3)$$



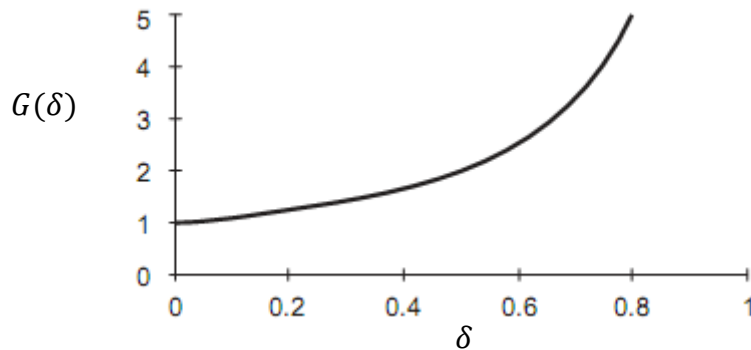
Portanto o ganho estático do conversor boost, para regime não lacunar, é [9]:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1-\delta} \quad (2.4)$$

Como  $\delta$  assume valores entre 0 e 1, pode-se concluir que  $V_{out} \geq V_{in}$ , cumprindo-se assim o objectivo deste conversor, isto é, apresentar à saída uma tensão superior à da entrada.



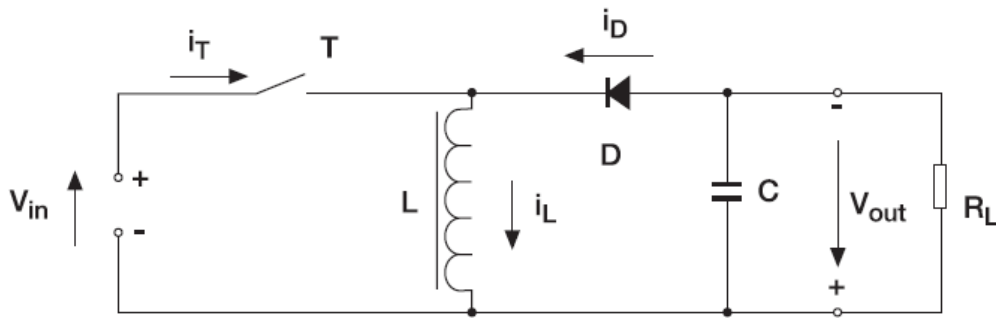
**Figura 2.8:** Formas de onda da corrente e tensão do conversor boost para regime não lacunar [15]



**Figura 2.9:** Ganho estático ( $G(\delta)=V_{out}/V_{in}$ ) em função do duty cycle ( $\delta$ ) do conversor boost

## Conversor step-up/down ou buck-boost

Este conversor gera à sua saída uma tensão DC superior ou inferior à tensão de entrada, conforme seja pretendido. Na figura 2.10 é apresentado o esquema eléctrico deste tipo de conversor.



**Figura 2.10:** Conversor step-up/down ou buck-boost [15]

Este conversor é uma junção dos dois conversores anteriores e o seu funcionamento baseia-se também no controlo da energia na bobina L. Este controlo é efectuado através do duty cycle do sinal PWM aplicado ao transístor. Uma das curiosidades deste conversor é que a tensão de saída ( $V_{out}$ ) é negativa em relação à massa. Divide-se em duas etapas o funcionamento deste conversor:

**1ª Etapa** – Ocorre quando o transístor está a conduzir. A corrente circula pela bobina, sendo durante esta etapa que a bobina L é magnetizada.

**2ª Etapa** – Nesta etapa o interruptor está aberto, ou seja, o transístor não está a conduzir. O diodo passa ao estado de condução e a energia armazenada na bobina L é transferida para a carga (saída), ocorrendo portanto a desmagnetização da bobina.

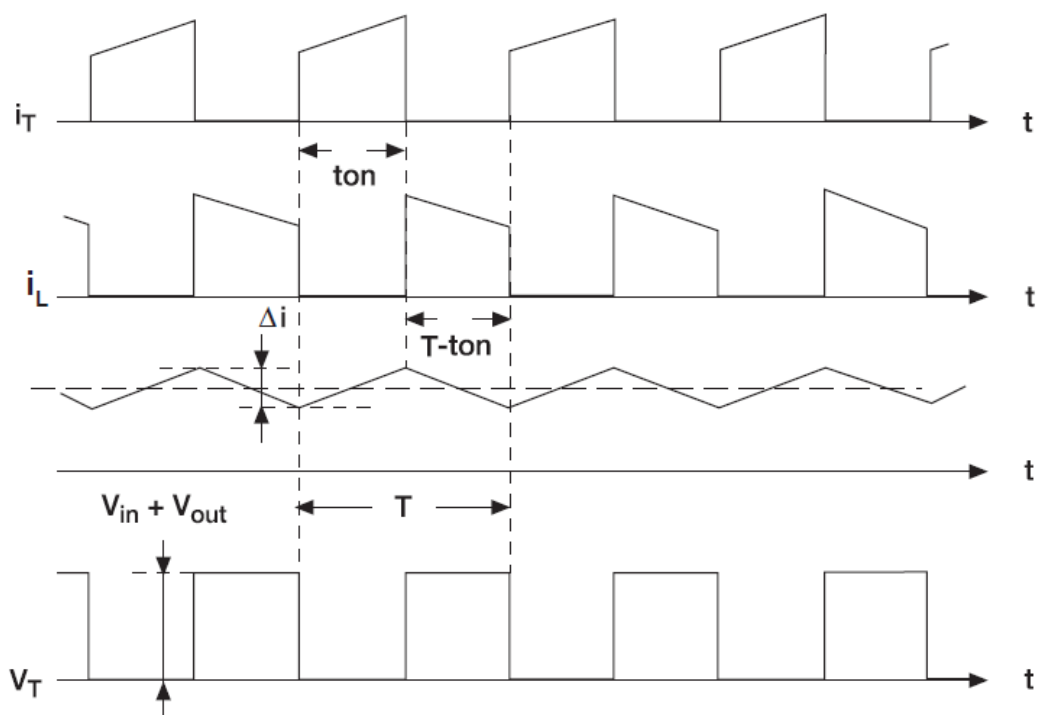
A equação que caracteriza este circuito é a seguinte:

$$V_{in} \cdot \delta \cdot T = -V_{out} \cdot (1 - \delta) \cdot T \quad (2.5)$$

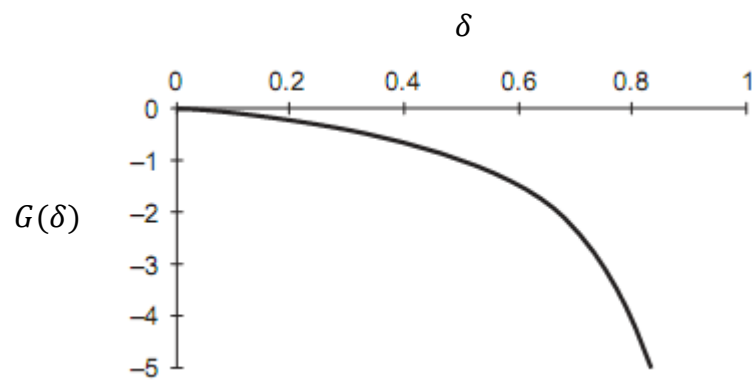
Logo o ganho estático, para regime não lacunar, é [9]:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{\delta}{1-\delta} \quad (2.6)$$

Como  $\delta$  assume valores entre 0 e 1, conclui-se que  $V_{out} \geq V_{in}$  ou  $V_{out} \leq V_{in}$ , de acordo com aquilo que seja pretendido. Verifica-se então que a tensão de saída pode ser maior ou menor (é igual quando  $\delta = 0,5$ ) que a tensão de entrada.



**Figura 2.11:** Formas de onda da corrente e tensão do conversor buck-boost para regime não lacunar [15]



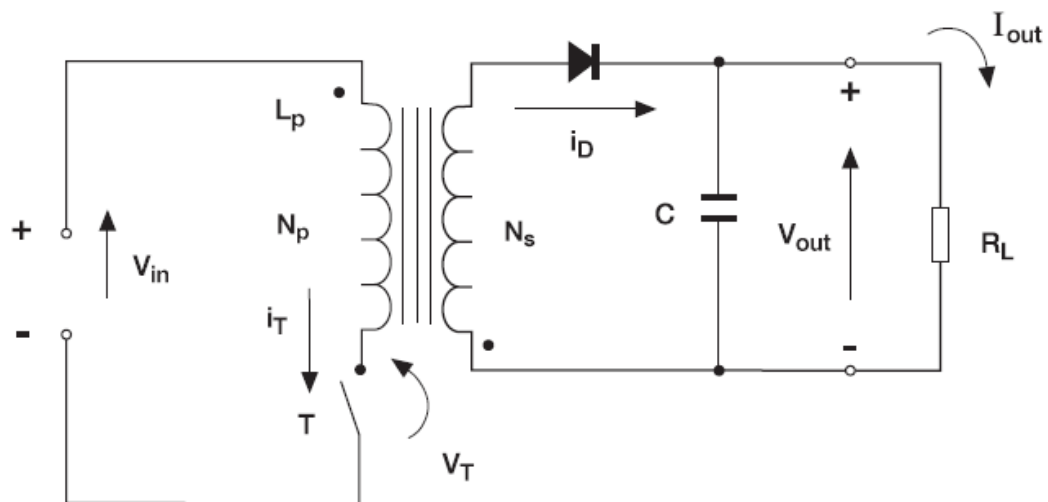
**Figura 2.12:** Ganho estático ( $G(\delta)=V_{\text{out}}/V_{\text{in}}$ ) em função do duty cycle ( $\delta$ ) do conversor buck-boost

## 2.2.2 Conversores DC/DC isolados

Este tipo de conversores, ao contrário dos anteriores, tem um transformador de alta frequência que assegura um isolamento magnético entre a entrada e a saída. À semelhança do que acontece com os conversores não isolados, o controlo é feito a partir de um sinal PWM com duty-cycle variável [9].

### Conversor Flyback

Derivado do conversor buck-boost, o conversor flyback, permite gerar à saída um sinal de tensão DC inferior ou superior ao sinal de entrada. O funcionamento de deste conversor baseia-se na quantidade de energia transferida entre a entrada e a saída.



**Figura 2.13:** Conversor DC/DC Flyback [15]

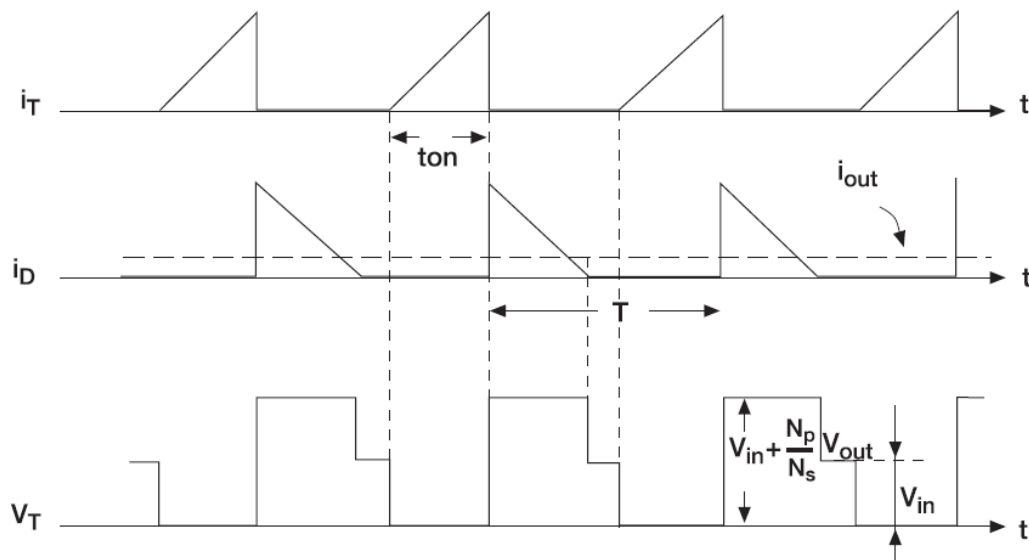
Observando o esquema eléctrico do conversor flyback, verifica-se que a bobina do transformador é utilizada para efectuar a transferência de energia. Deste modo é feito um isolamento entre a entrada e a saída do circuito enquanto é feita a transferência de energia.

Quando o transístor está ligado a energia é armazenada no enrolamento primário do transformador, e quando o transístor está desligado é transferida para o enrolamento secundário. O ganho estático do conversor flyback, para regime não lacunar, é [15]:

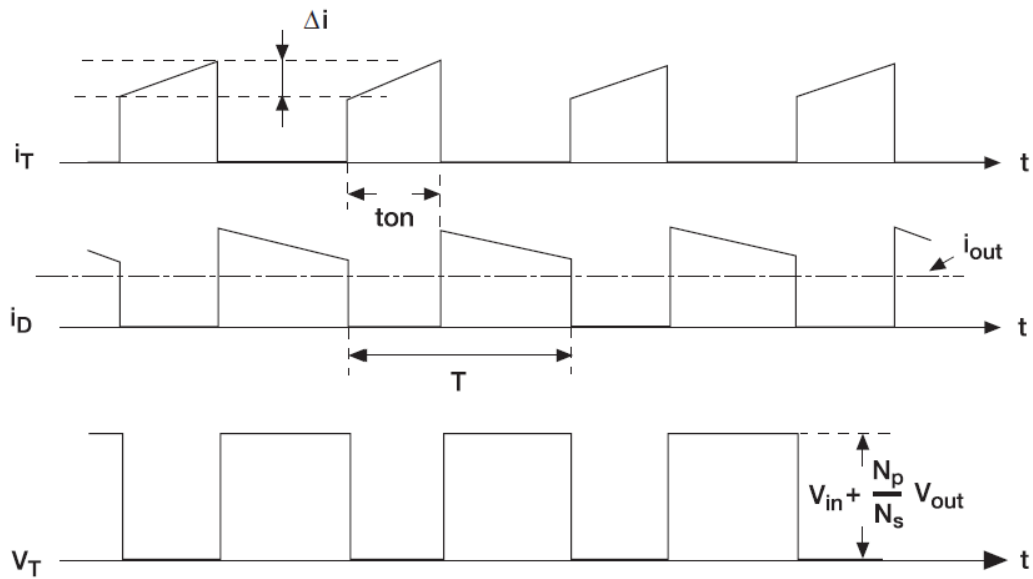
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{N_s}{N_p} \frac{\delta}{1-\delta} \quad (2.7)$$

Verifica-se que quando  $N_s=N_p$ , a equação é semelhante à função de transferência do conversor buck-boost.

Neste tipo de conversores, quando o transístor desliga está sujeito a altos picos de tensão. Deste modo é aconselhada a utilização de um circuito snubber montado em paralelo com o transístor para evitar a destruição do interruptor.



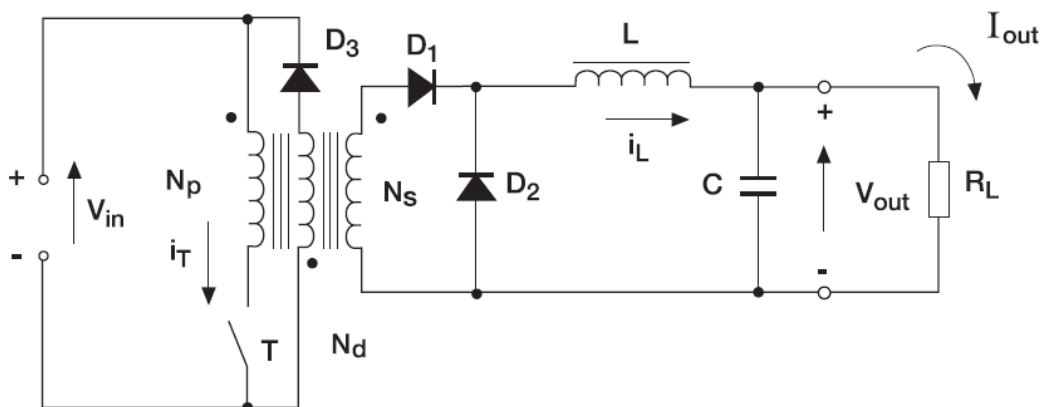
**Figura 2.14:** Formas de onda de tensão e corrente do conversor flyback a operar em regime lacunar (modo descontínuo) [15]



**Figura 2.15:** Formas de onda de tensão e corrente do conversor flyback a operar em regime não lacunar (modo contínuo) [15]

## Conversor Forward

O conversor forward deriva de um conversor DC/DC não isolado, mais concretamente do conversor buck ou step-down. Dependendo da razão de transformação, este conversor gera à saída um sinal com um nível superior ou inferior ao da entrada.

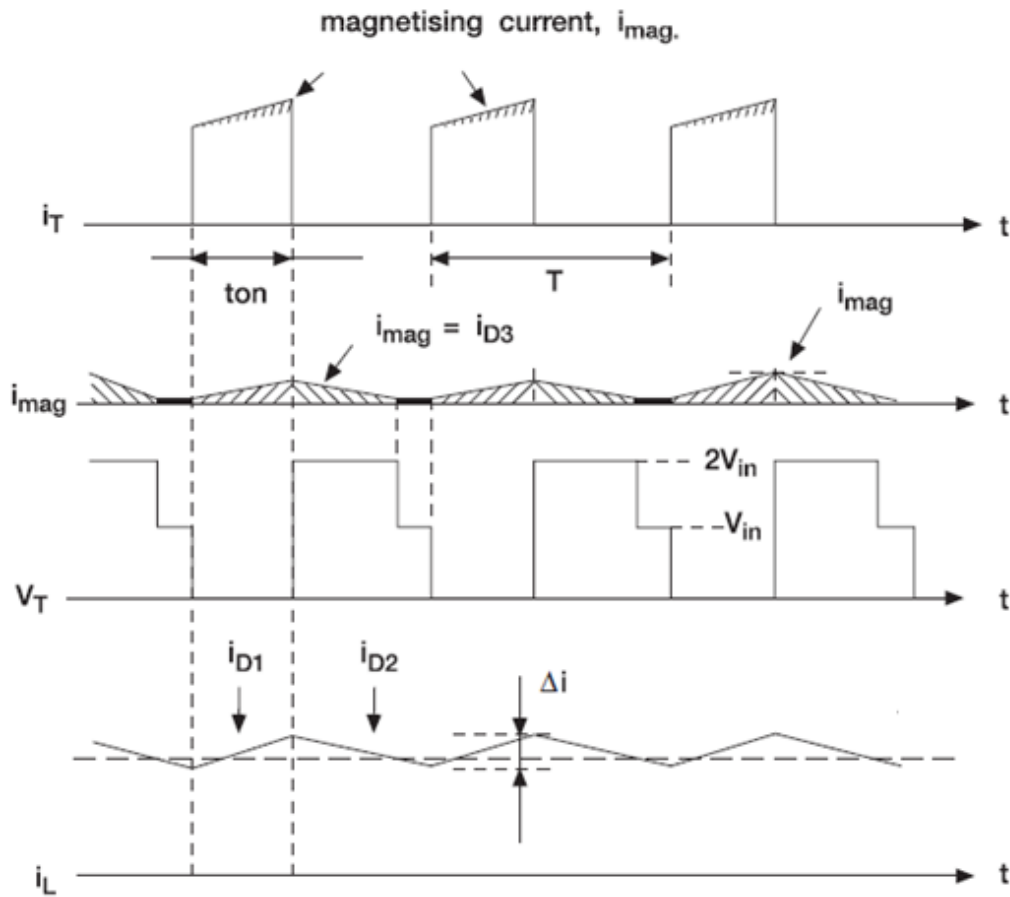


**Figura 2.16:** Conversor DC/DC Forward [15]

Este conversor, quando o transístor está ligado, transfere directamente a energia da entrada para a saída. Quando o transístor está desligado, a energia armazenada na bobina L circula através do diodo  $D_2$ . O ganho estático do conversor forward, para regime não lacunar, é [15]:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{N_s}{N_p} \delta \quad (2.8)$$

Verifica-se que quando  $N_s=N_p$ , a função de transferência é igual à do conversor buck.

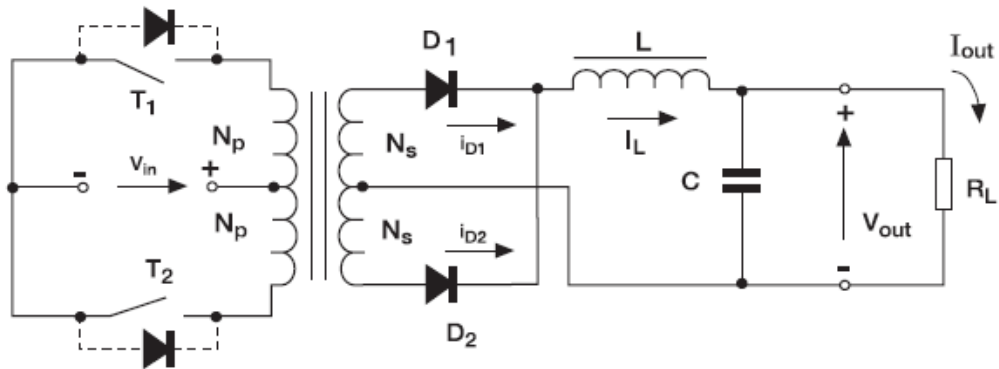


**Figura 2.17:** Formas de onda de tensão e corrente do conversor forward [15]



## Conversor Push-Pull

Tal como o conversor forward, o conversor push-pull, deriva do conversor DC/DC step-down. Este conversor é composto por dois conversores forward a operar em oposição de fase, como se pode observar na figura 2.18. Assim como o conversor forward, o conversor push-pull tem como objectivo gerar à saída um sinal com nível superior ao inferior ao sinal de entrada.



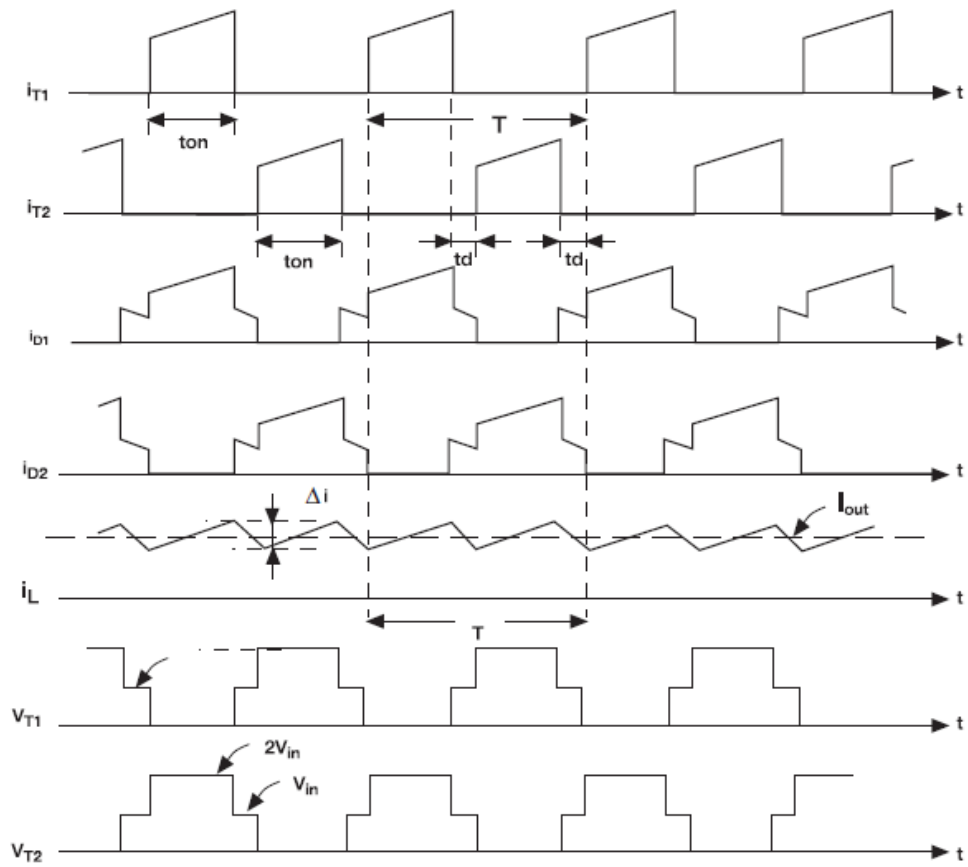
**Figura 2.18:** Conversor DC/DC Push-Pull [15]

Os transístores  $T_1$  e  $T_2$  estão ligados alternadamente, fazendo com que a frequência na saída seja o dobro da frequência de comutação dos transístores. Este aspecto possibilita uma menor oscilação do sinal na saída do conversor.

O ganho estático do conversor push-pull, em regime não lacunar, é [15]:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 2 \frac{N_s}{N_p} \delta \quad 0 < \delta < 0,5 \quad (2.9)$$

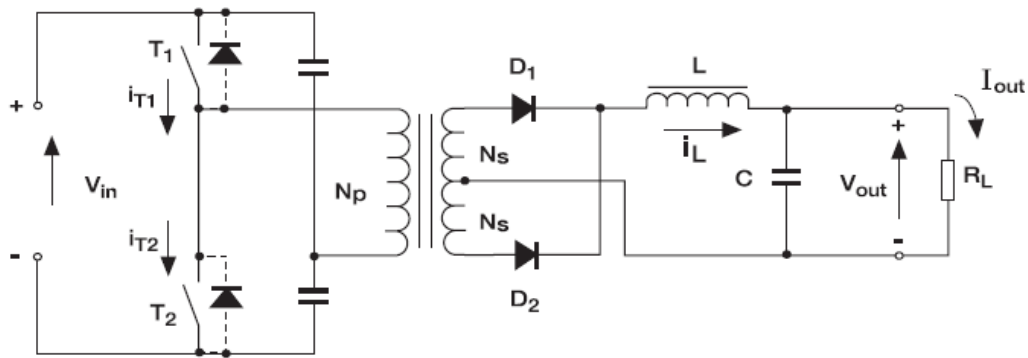
O duty-cycle deve ser inferior a 0,5 de modo a evitar a condução em simultâneo dos transístores. Assim o sinal PWM aplicado no transístor  $T_2$  deve estar desfasado meio período para garantir que não ocorre nenhum curto-circuito.



**Figura 2.19:** Formas de onda de tensão e corrente do conversor Push-Pull [15]

## Conversor em meia ponte

O conversor em meia ponte também deriva do conversor step-down, e permite obter na saída um sinal inferior ou superior ao sinal de entrada.

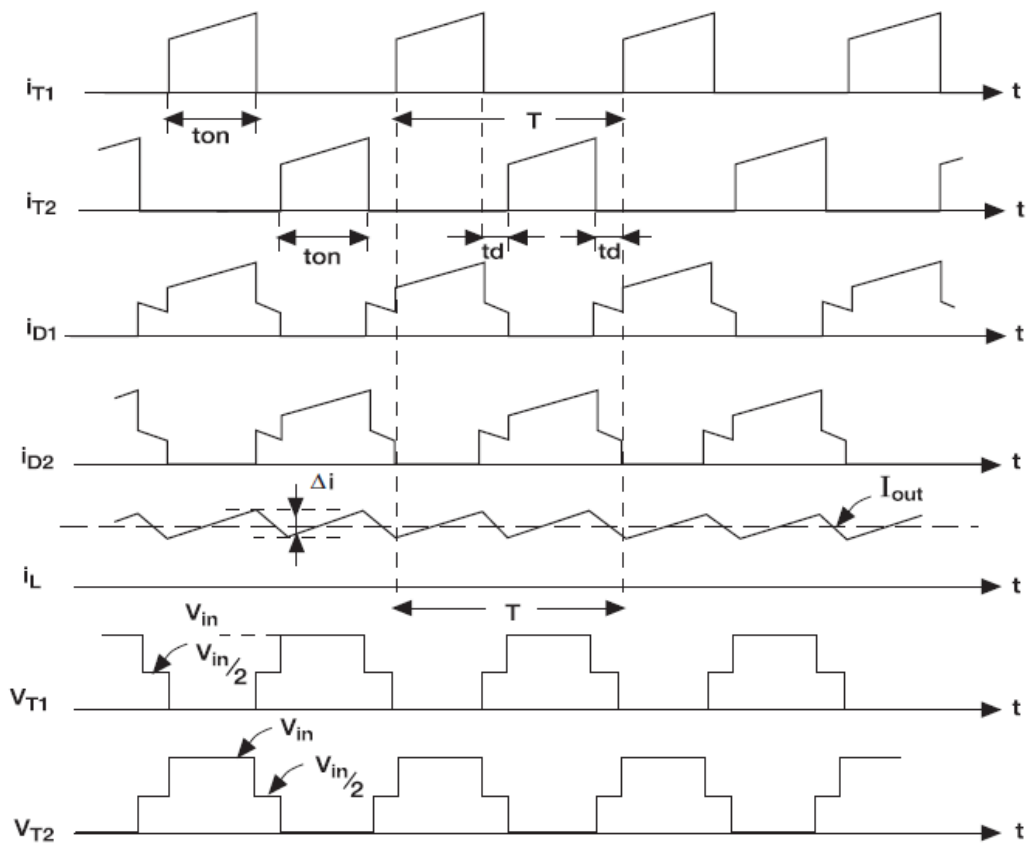


**Figura 2.20:** Conversor DC/DC Meia Ponte [15]

Tal como no conversor push-pull, os transístores estão ligados alternadamente. Quando  $T_1$  está ligado, é aplicado ao primário do transformador uma tensão positiva, e quando  $T_2$  está ligado é aplicado ao primário uma tensão negativa. A ligação de dois condensadores em série e dois transístores, permite ter no primário uma tensão que é  $\pm \frac{V_{in}}{2}$ . O ganho estático deste conversor, em regime não lacunar, é [15]:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{N_s}{N_p} \delta \quad 0 < \delta < 0,5 \quad (2.10)$$

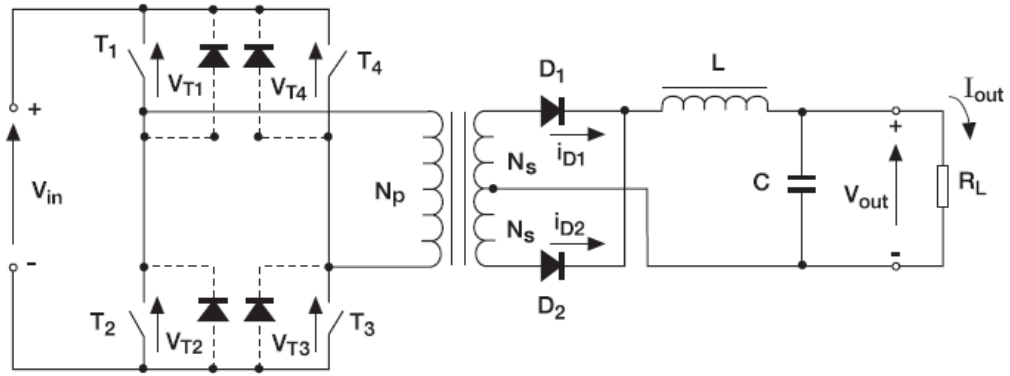
Observa-se que o ganho deste conversor é metade do ganho do conversor push-pull, pois a tensão que é aplicada no primário é metade de  $V_{in}$ .



**Figura 2.21:** Formas de onda de tensão e corrente do conversor em Meia Ponte [15]

## Conversor em Ponte Completa

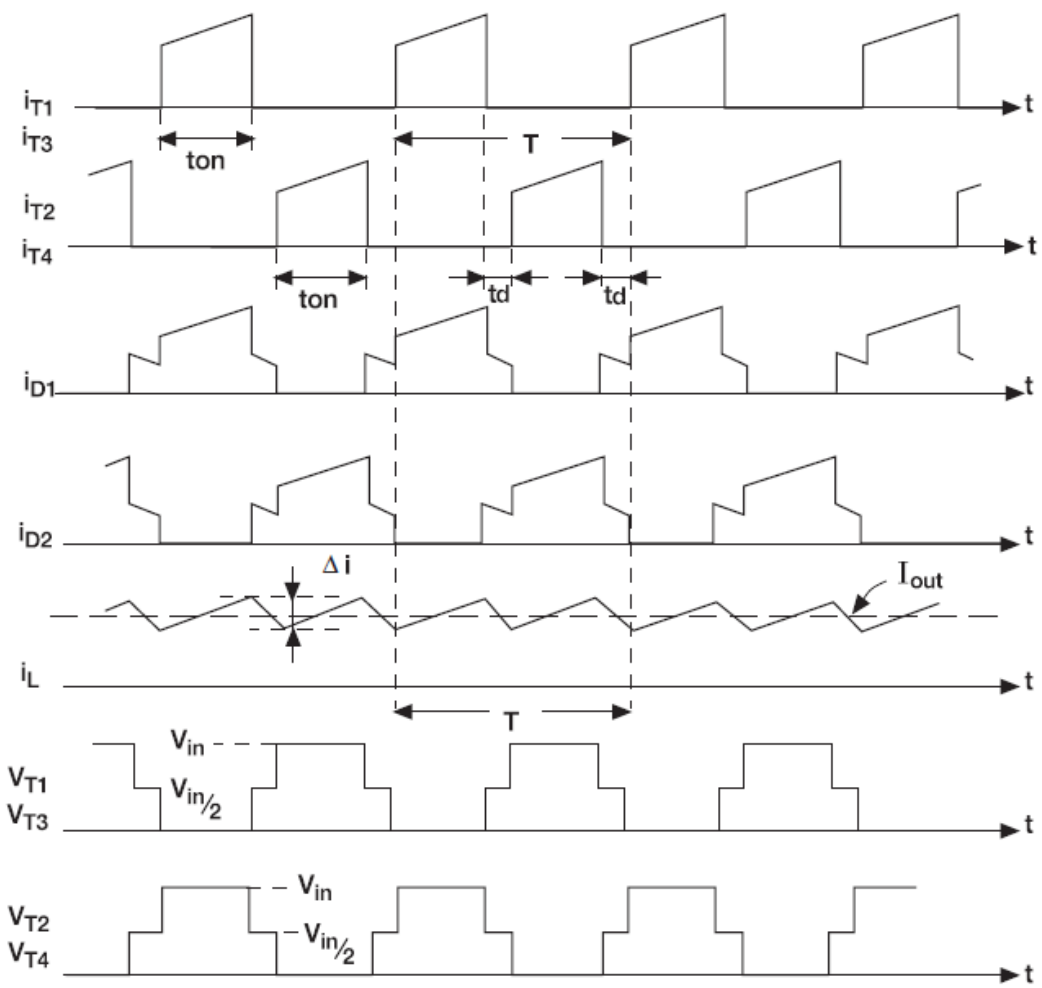
O conversor em ponte completa permite obter um comportamento semelhante ao conversor em meia ponte.



**Figura 2.22:** Conversor DC/DC Ponte Completa [15]

No entanto este conversor apresenta um ganho que é o dobro do ganho do conversor em meia ponte. Isto ocorre pois neste conversor é aplicado no primário uma tensão  $\pm V_{in}$ . Deste modo o ganho estático do conversor em ponte completa, em regime não lacunar, é:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 2 \frac{N_s}{N_p} \delta \quad 0 < \delta < 0,5 \quad (2.11)$$



**Figura 2.23:** Formas de onda de tensão e corrente do conversor em Ponte Completa [15]

## 2.3 Métodos Maximum Power Point Tracking - MPPT

Devido ao elevado custo inicial de instalação e à baixa taxa de conversão das células fotovoltaicas, os painéis fotovoltaicos devem estar otimizados para se retirar sempre a máxima potência possível. O ponto de potência máxima de um painel fotovoltaico é variável pois depende da radiação solar e da temperatura, como já foi visto no capítulo anterior. Deste modo é utilizado um método de controlo denominado “*Maximum Power Point Tracking*” (MPPT), para se conseguir a cada instante que o painel fotovoltaico opere no seu ponto de potência máxima.

O controlo MPPT tem como objectivo orientar o funcionamento do conversor no sentido de conseguir extrair do painel fotovoltaico, a cada instante, a maior potência possível.

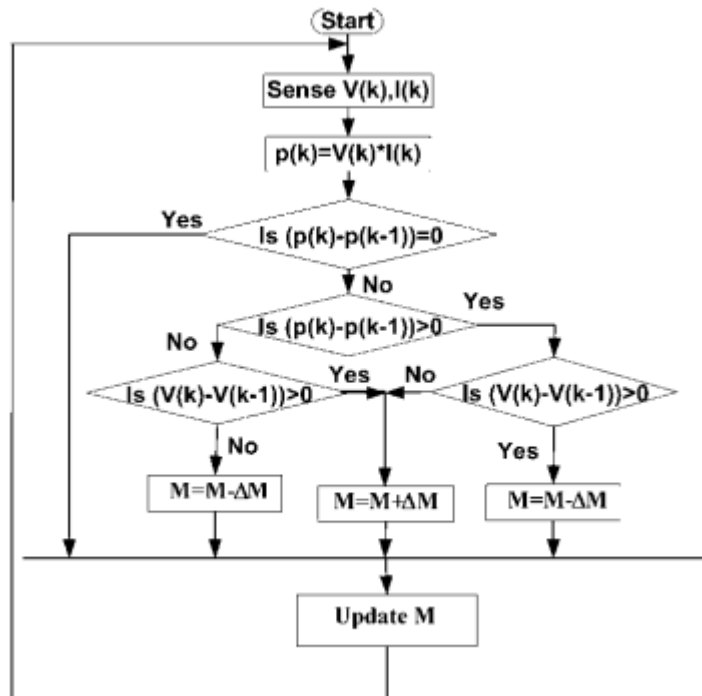
Seguidamente são apresentados alguns métodos MPPT, de forma que sejam evidenciadas as vantagens e desvantagens de cada método. Os métodos apresentados são os seguintes:

- *Hill Climbing*
- Tensão Constante
- Oscilação do Sistema
- Correlação Ripple

### 2.3.1 Hill Climbing

Este é o algoritmo mais utilizado nos sistemas de conversão de energia, devido ao seu baixo grau de complexidade. Este método consiste em fazer variar o índice de modulação ( $M$ ) e consequentemente variar a corrente e a tensão do painel fotovoltaico. A corrente e a tensão actuais do painel são medidas, e tendo em conta leituras anteriores, é calculada em que posição da curva de potência se encontra.

Depois de saber essa posição o algoritmo altera (ou mantém, caso já se encontre no ponto de máxima potência) o valor do índice de modulação ( $M$ ), de forma a colocar o painel fotovoltaico a operar no ponto de máxima potência [13, 14].



**Figura 2.24:** Algoritmo MPPT *Hill Climbing* [14]

Pela observação da figura 4.1, verifica-se que em primeiro lugar o algoritmo mede a tensão e a corrente e calcula a potência apresentada pelo painel fotovoltaico. De seguida compara o valor actual com o valor anterior da potência do painel. Se os valores forem iguais, o valor do índice de modulação ( $M$ ) mantém-se igual, terminando assim essa iteração. Caso os valores da potência, actual e anterior, sejam diferentes, são comparados os valores da tensão, actual e anterior, do painel de forma a localizar em que zona da curva de potência se encontra. Com base nessa localização, o valor de  $M$  aumenta ou diminui de maneira a que se atinja o ponto de máxima potência do painel fotovoltaico.



### 2.3.2 Tensão Constante

Este algoritmo baseia-se no facto de que a relação entre tensão associada ao ponto de máxima potência ( $V_{MPP}$ ) e a tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ) é praticamente constante, sendo este valor aproximadamente 0,78. Valor este que é independente das condições exteriores ao painel fotovoltaico. Existem duas formas de obter o valor de  $V_{OC}$ . Este valor pode ser obtido através de uma célula do painel em circuito aberto ou através do método proposto por *Kobayashi et al.* [26], que consiste em utilizar um diodo colocado no painel fotovoltaico e assim medir a tensão  $V_{OC}$  (o diodo tem que estar à mesma temperatura do painel).

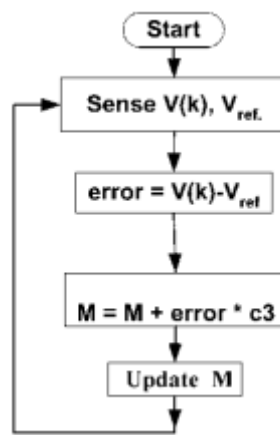


Figura 2.25: Algoritmo MPPT Tensão Constante [14]

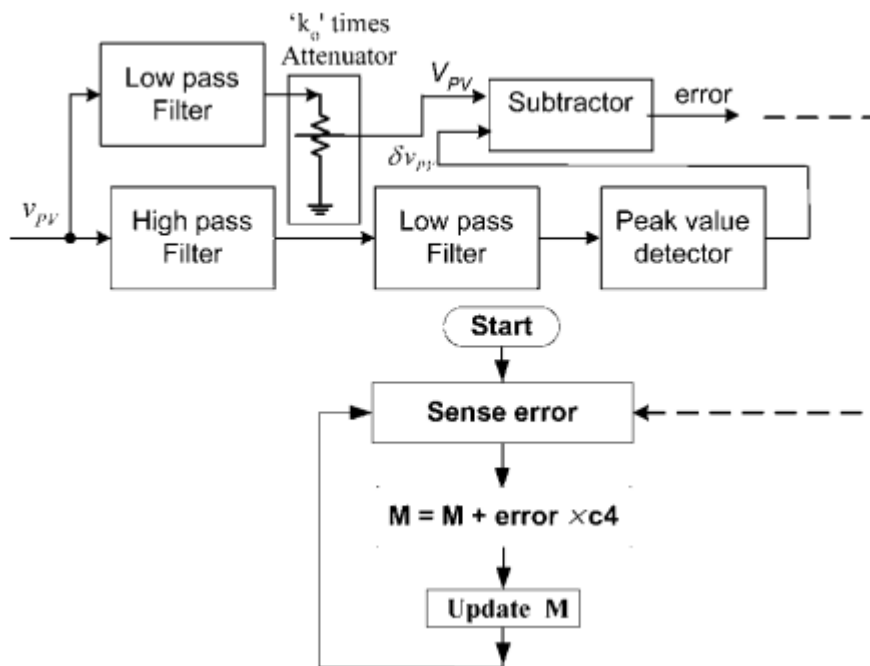
### 2.3.3 Oscilação do Sistema

O método de oscilação do sistema é baseado no teorema de transferência máxima de potência. O ponto de potência máxima é encontrado através do quociente entre o pico da resistência dinâmica ( $\delta_{ri}$ ) e o dobro da resistência interna ( $r_g$ ) do painel  $\left(\frac{\delta_{ri}}{2r_g}\right)$ .

Este quociente é substituído por uma variável  $K_0$ , que no ponto de potência máxima é calculada pela seguinte equação [14]:

$$K_0 = \frac{\delta V_{pv}}{V_{pv}} \quad (2.12)$$

Onde  $\delta V_{pv}$  é o pico do ripple da tensão do painel fotovoltaico. Deste modo verifica-se que neste método é apenas necessário medir a tensão do painel fotovoltaico. Posteriormente, utilizando filtros, são calculados os restantes elementos necessários para a aplicação deste método.



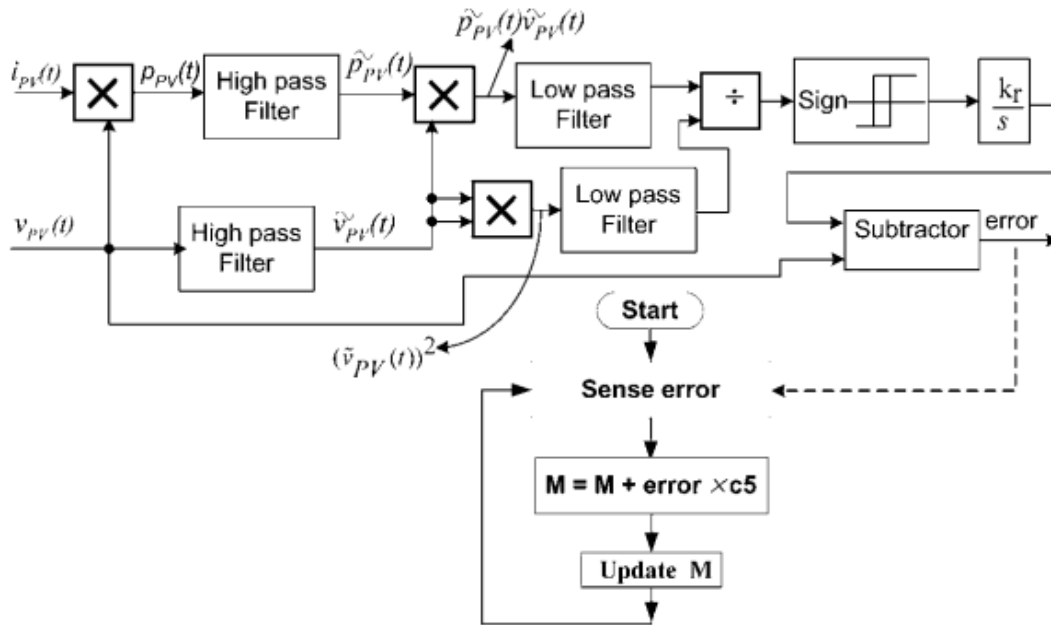
**Figura 2.26:** Algoritmo MPPT Oscilação do Sistema [14]

Pela observação da figura 4.3, verifica-se que em primeiro lugar é calculado o erro entre o quociente do pico da resistência dinâmica e o dobro da resistência interna do painel com a variável  $K_0$ . Depois o índice de modulação,  $M$ , é alterado de acordo com o erro obtido, de modo a colocar o painel fotovoltaico a funcionar no ponto de máxima potência.

### 2.3.4 Correlação de Ripple

Este método foi desenvolvido pela primeira vez por Krein [28] e posteriormente modificado para ser aplicado em sistemas fotovoltaicos. É caracterizado por não ser necessário conhecer os parâmetros do painel ao qual vai ser aplicado.

O primeiro passo deste método é a medição da tensão e da corrente do painel fotovoltaico e o cálculo da potência. Utilizam-se filtros passa-alto, com o objectivo de identificar as componentes de alta frequência presentes na tensão e na potência e calcula-se  $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}}$ . A partir do sinal de  $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}}$ , encontrado com uma função *sign*, este método consegue localizar a zona da curva de potência em que o painel se encontra. Depois a variável é integrada e calcula-se a tensão de referência que coloca o painel a funcionar no ponto de potência máxima. Esta tensão de referência é comparada com a tensão real do painel para gerar o erro correspondente. O erro é utilizado para modificar o índice de modulação (M), de forma que o painel atinja ao ponto de máxima potência.



**Figura 2.27:** Algoritmo MPPT Correlação de Ripple [14]



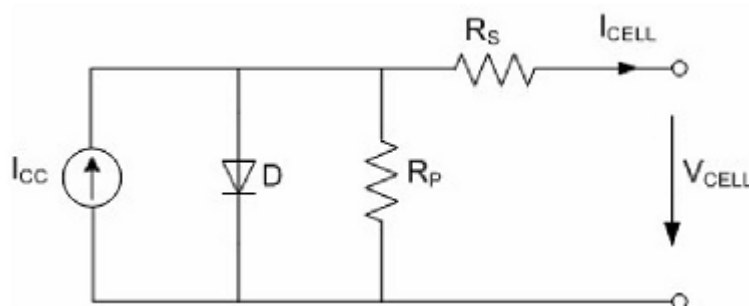
## Capítulo 3 - Painéis Fotovoltaicos

---

Neste capítulo é efectuada uma análise à forma de funcionamento do painel fotovoltaico. É apresentado o circuito equivalente do painel solar fotovoltaico, são expostas as curvas características do painel bem como essas curvas são afectadas pelos factores ambientais (temperatura e radiação solar). De modo a simular as características do painel fotovoltaico foram efectuadas simulações utilizando Matlab R2009a. O painel foi modelado utilizando as equações que o caracterizam e são mostrados os resultados das simulações para vários valores de temperatura e radiação solar.

### 3.1 Circuito Equivalente de um Painel Fotovoltaico

O painel fotovoltaico é constituído por várias células fotovoltaicas ligadas entre si, sendo responsável pela transformação de fotões emitidos pelo sol em energia eléctrica, através do efeito fotovoltaico. Separadamente cada célula fotovoltaica produz pouca energia e gera uma tensão muito baixa. De forma a conseguir gerar mais energia, as células fotovoltaicas são ligadas em série e paralelo formando os painéis fotovoltaicos. O circuito equivalente de uma célula fotovoltaica está representado na figura 3.1.



**Figura 3.1:** Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica [7]

A corrente de saída da célula fotovoltaica, em função da radiação solar e da temperatura da célula, é dada pela seguinte equação [32, 33]:

$$I_{cel} = I_{cc} - I_{sat} \cdot \left[ \exp \left( \frac{V_{cel} + I_{cel} \cdot R_s}{n \cdot V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V_{cel} + I_{cel} \cdot R_s}{R_p} \quad (3.1)$$

Com  $V_t = \frac{K \cdot T_{cel}}{e}$

Na equação 3.1,  $I_{sat}$  é a corrente de saturação,  $V_t$  é designado por potencial térmico,  $K$  é a constante de *Boltzmann*,  $T_{cel}$  é a temperatura da célula fotovoltaica em Kelvin,  $e$  é a carga do electrão,  $n$  é o factor de idealidade do diodo.  $I_{cel}$  e  $V_{cel}$  são respectivamente a corrente e a tensão de saída da célula fotovoltaica.  $I_{cc}$  é a corrente de curto-circuito da célula que depende da radiação solar e da temperatura da célula.  $R_s$  é o resistor em série e  $R_p$  é o resistor em paralelo.

No caso de um painel fotovoltaico a equação equivalente é a seguinte [32, 33]:

$$I_{cel} = N_p \cdot I_{cc} - N_p \cdot I_{sat} \cdot \left[ \exp \left( \frac{\frac{V_{cel}}{N_s} + \frac{I_{cel} \cdot R_s}{N_p}}{n \cdot V_t} \right) - 1 \right] - \frac{\frac{N_p \cdot V_{cel}}{N_s} + \frac{I_{cel} \cdot R_s}{N_p}}{R_p} \quad (3.2)$$

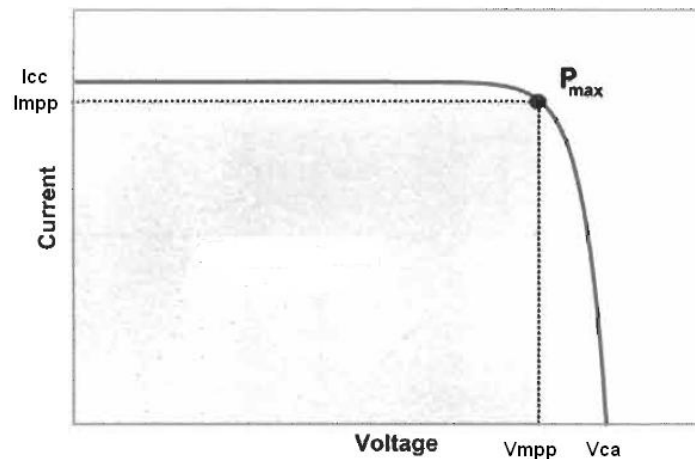
$N_s$  é o número de células fotovoltaicas em série e  $N_p$  é o número de células fotovoltaicas em paralelo.

## 3.2 Curvas Características de um Painel Fotovoltaico

A representação gráfica da saída de um painel fotovoltaico denomina-se por curva corrente tensão (curva I-V).

Como a corrente de saída de um painel fotovoltaico se mantém praticamente constante ao longo da amplitude da tensão de funcionamento, pode-se considerar o painel fotovoltaico como uma fonte de corrente constante.

A temperatura das células fotovoltaicas, a radiação solar e as características da carga ligada ao painel, determinam a corrente e a tensão a que o painel fotovoltaico opera.



**Figura 3.2:** Curva I-V de um painel fotovoltaico [5]

Na figura 3.2 estão representadas as seguintes características:

**Corrente de curto-circuito  $I_{cc}$ :** Corrente máxima que o painel pode fornecer, sob determinadas condições de radiação e temperatura, quando a tensão nos seus terminais é nula e consequentemente a potência também é nula.

**Tensão de circuito-aberto  $V_{ca}$ :** Tensão máxima fornecida pelo painel quando a corrente é nula, sob determinadas condições de radiação e temperatura.

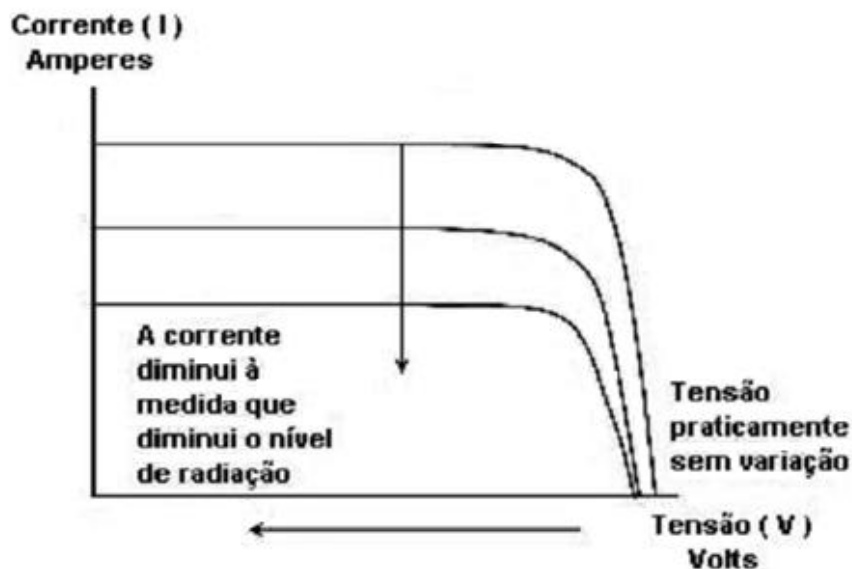
**Ponto de potência máxima  $P_{MP}$ :** Ponto da curva I-V no qual o produto da corrente com a tensão é máximo.

### 3.3 Efeito dos Factores Ambientais sobre a Curva Característica de um Painel Fotovoltaico

#### Variação da intensidade da radiação solar

A corrente de saída varia com a mudança da intensidade da radiação solar para qualquer valor de tensão.

A tensão mantém-se praticamente constante, enquanto a corrente varia com de forma directamente proporcional com a radiação.



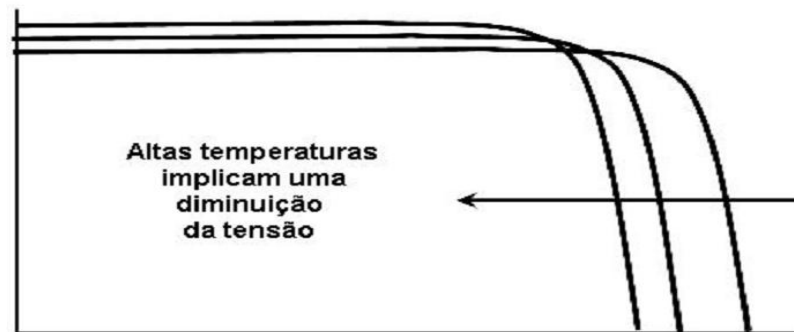
**Figura 3.3:** Efeito da intensidade da radiação solar na curva I-V de um painel fotovoltaico

#### Variação da temperatura

O aumento da temperatura provoca uma redução da tensão nos terminais do painel fotovoltaico de forma directamente proporcional. Existe também um pequeno aumento da corrente para valores de tensão baixos.



Devido a esta característica, em locais com temperatura ambiente muito elevada, convém utilizar painéis que possuam maior número de células em serie de forma a se conseguir ter uma tensão de saída suficiente.



**Figura 3.4:** Efeito da variação da temperatura na curva I-V de um painel fotovoltaico

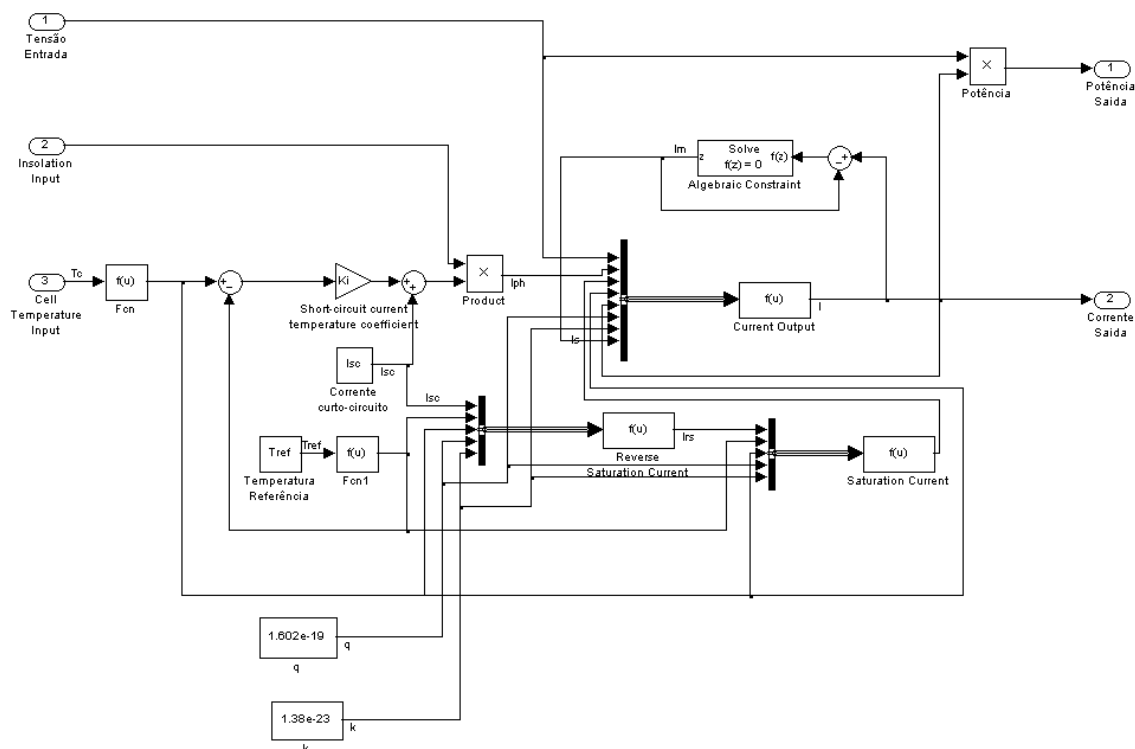
### 3.4 Modelação do Painel Fotovoltaico em Matlab

A partir da equação que caracteriza o painel fotovoltaico, foi efectuada uma simulação utilizando o programa Matlab R2009a. A simulação foi efectuada para várias temperaturas e diversos níveis de radiação solar. Os resultados da simulação são muito aproximados dos resultados reais.

As características do painel fotovoltaico em estudo são as seguintes:

Bangkok Solar – BS 40	
Material	a-Si (Silício Amorfo)
$P_{\max}$ ( $W_p$ )	40
$V_{MPP}$ (V)	44.8
$I_{MPP}$ (A)	0.9
$V_{ca}$ (V)	62.2
$I_{cc}$ (A)	1.16

**Tabela 3.1:** Características do painel fotovoltaico em estudo

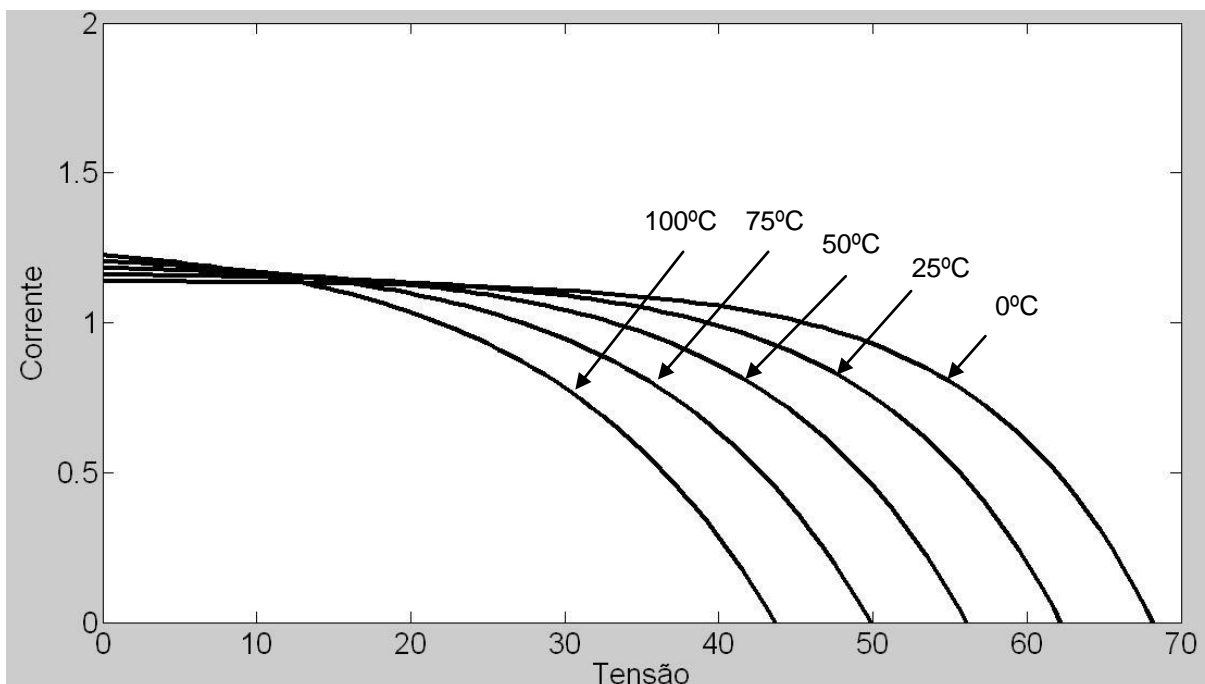


**Figura 3.5:** Modelo do painel fotovoltaico simulado com o programa Matlab

A corrente do painel fotovoltaico é calculada através de uma função recursiva, como se pode observar na expressão 3.2. Em Matlab/Simulink a forma mais simples de resolver este tipo de funções é utilizar o bloco “Algebraic Constraint”. Este bloco coloca na saída o valor que origina o valor zero na entrada, ou seja coloca na saída o valor necessário para anular a entrada.

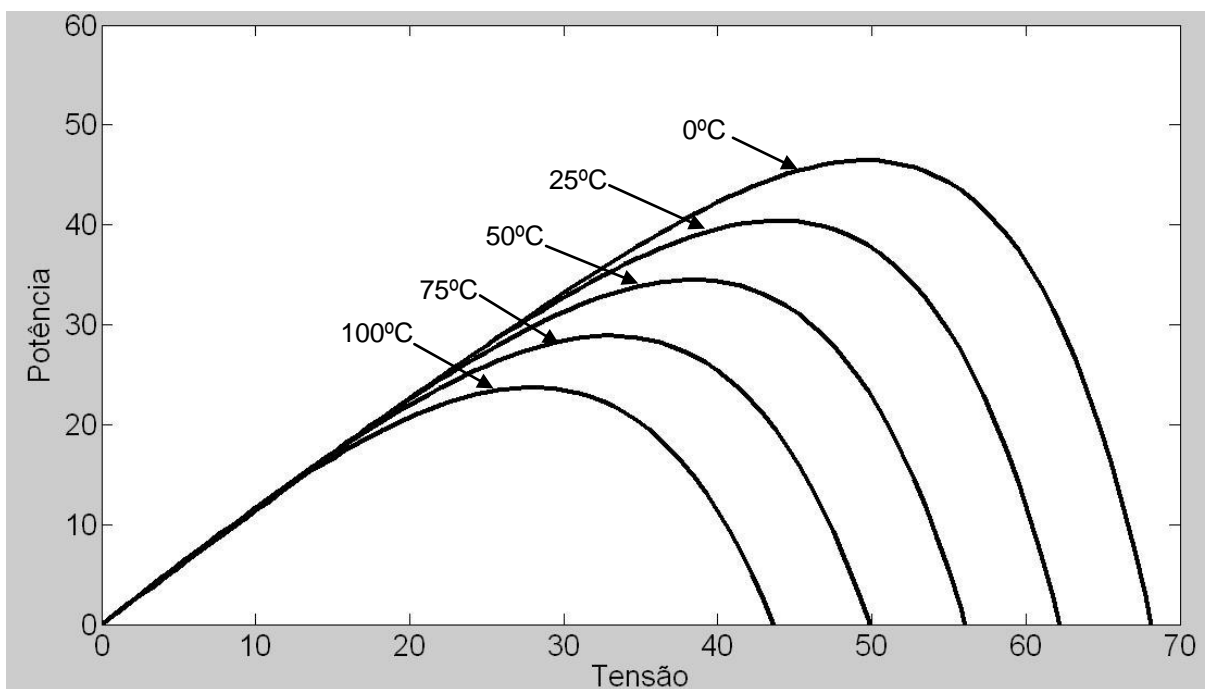
### 3.4.1 Variação da Temperatura

Na figura 3.6 estão representadas as curvas I-V de resposta do painel fotovoltaico à variação de temperatura. Foi feita a simulação para cinco temperaturas diferentes, 0°C, 25°C, 50°C, 75°C e 100°C. A radiação solar manteve-se constante nos 1000 W/m<sup>2</sup>.



**Figura 3.6:** Curvas I-V para diferentes temperaturas

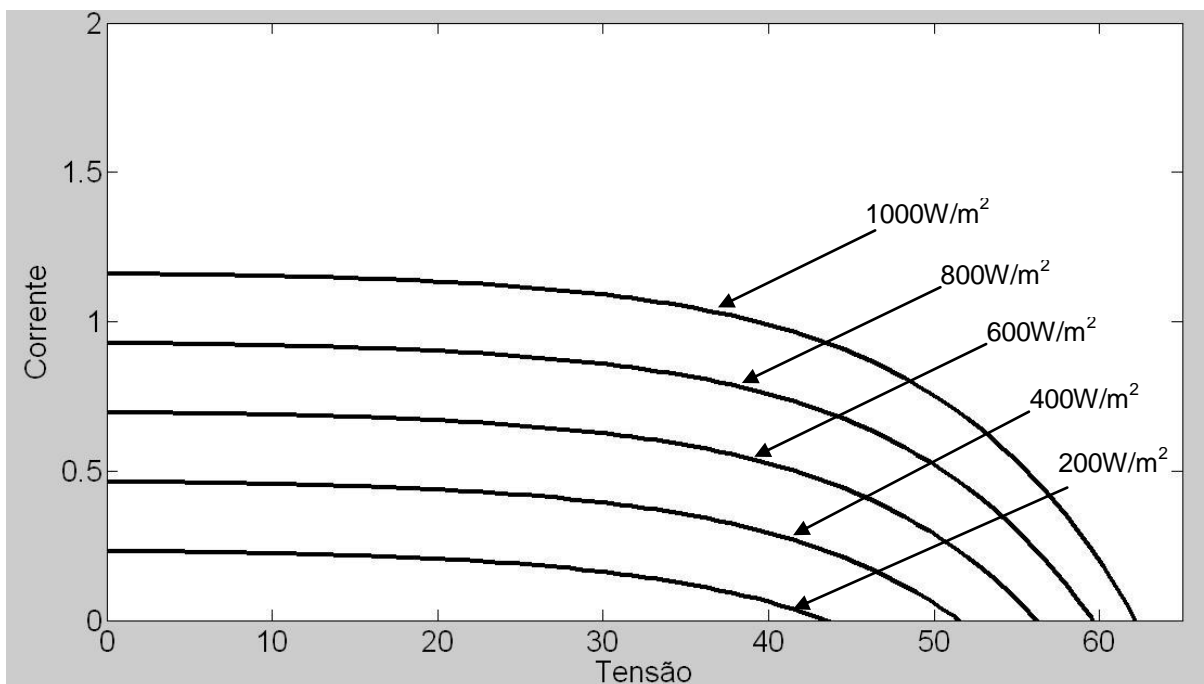
A figura 3.7 apresenta as curvas P-V para diferentes temperaturas com radiação solar constante de  $1000 \text{ W/m}^2$ . Verifica-se que a potência do painel aumenta à medida que a temperatura diminui.



**Figura 3.7:** Curvas P-V para diferentes temperaturas

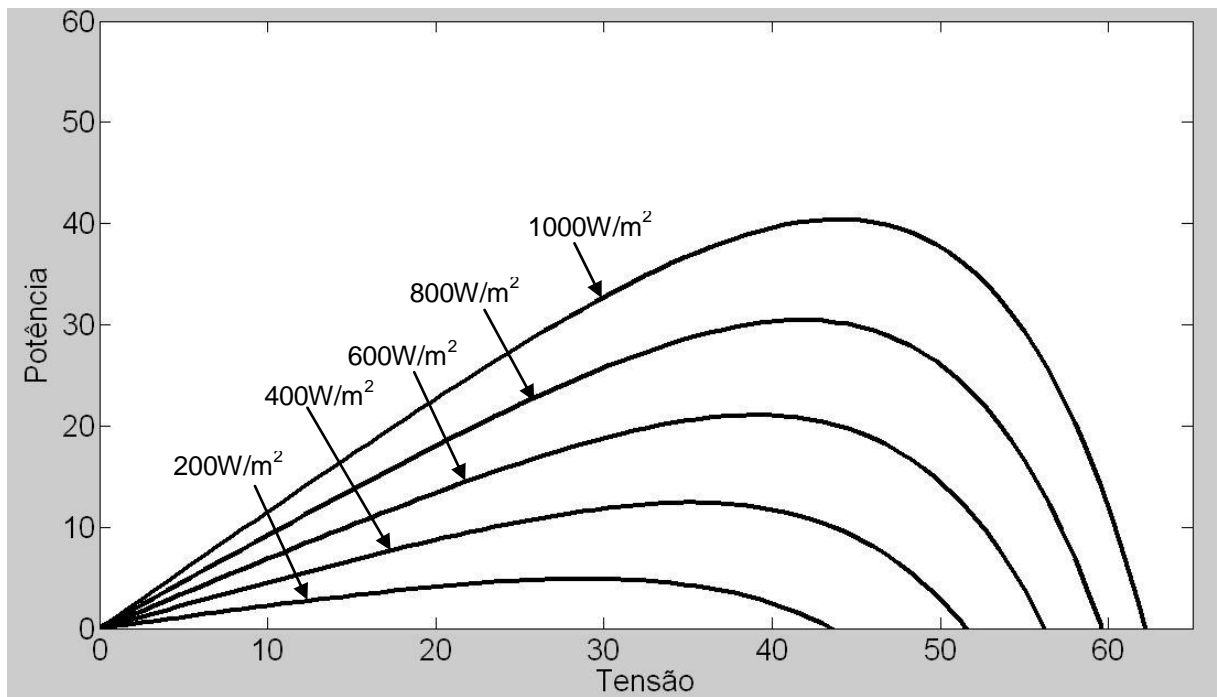
### 3.4.2 Variação da Radiação Solar

Na figura 3.8 estão representadas as curvas I-V de resposta do painel fotovoltaico à variação da radiação solar. Foi feita a simulação para cinco radiações diferentes, 200 W/m<sup>2</sup>, 400 W/m<sup>2</sup>, 600 W/m<sup>2</sup>, 800 W/m<sup>2</sup> e 1000 W/m<sup>2</sup>. A temperatura manteve-se constante nos 25°C.



**Figura 3.8:** Curvas I-V para diferentes radiações

Na figura 3.9 estão representadas as curvas P-V para vários valores da radiação solar e temperatura constante de 25°C. Observa-se que quanto mais elevada é a radiação solar, maior é a potência debitada pelo painel fotovoltaico.



**Figura 3.9:** Curvas P-V para vários valores da radiação solar

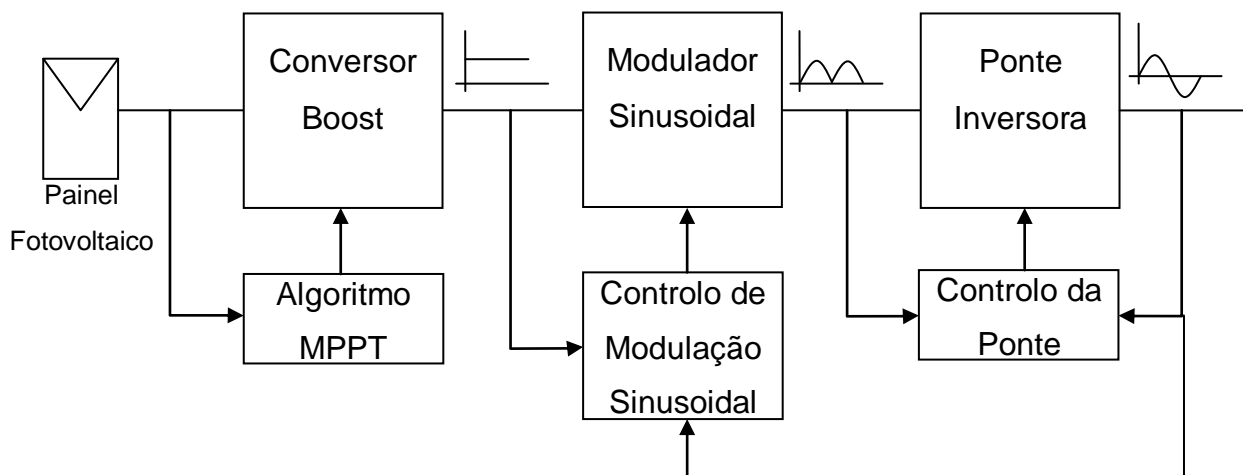


## Capítulo 4 - Desenvolvimento do Conversor

---

Neste capítulo é efectuado a análise sobre todo o processo de conversão de energia, desde o painel fotovoltaico até à rede eléctrica. Este processo de conversão é constituído por 3 etapas:

- **Seguidor do ponto de potência máxima:** Tem como objectivo elevar a tensão do painel fotovoltaico para a próxima etapa, sendo que simultaneamente extrai a potência máxima do painel.
- **Modulação sinusoidal:** Tem como objectivo gerar uma onda sinusoidal rectificada com a mesma fase que a onda de rede pública.
- **Ponte inversora de saída:** Desdobra a onda sinusoidal rectificada numa sinusóide completa em fase com a rede pública.



**Figura 4.1:** Diagrama de blocos do processo de conversão

## 4.1 Seguidor do Ponto de Potência Máxima

### 4.1.1 Método MPPT Implementado

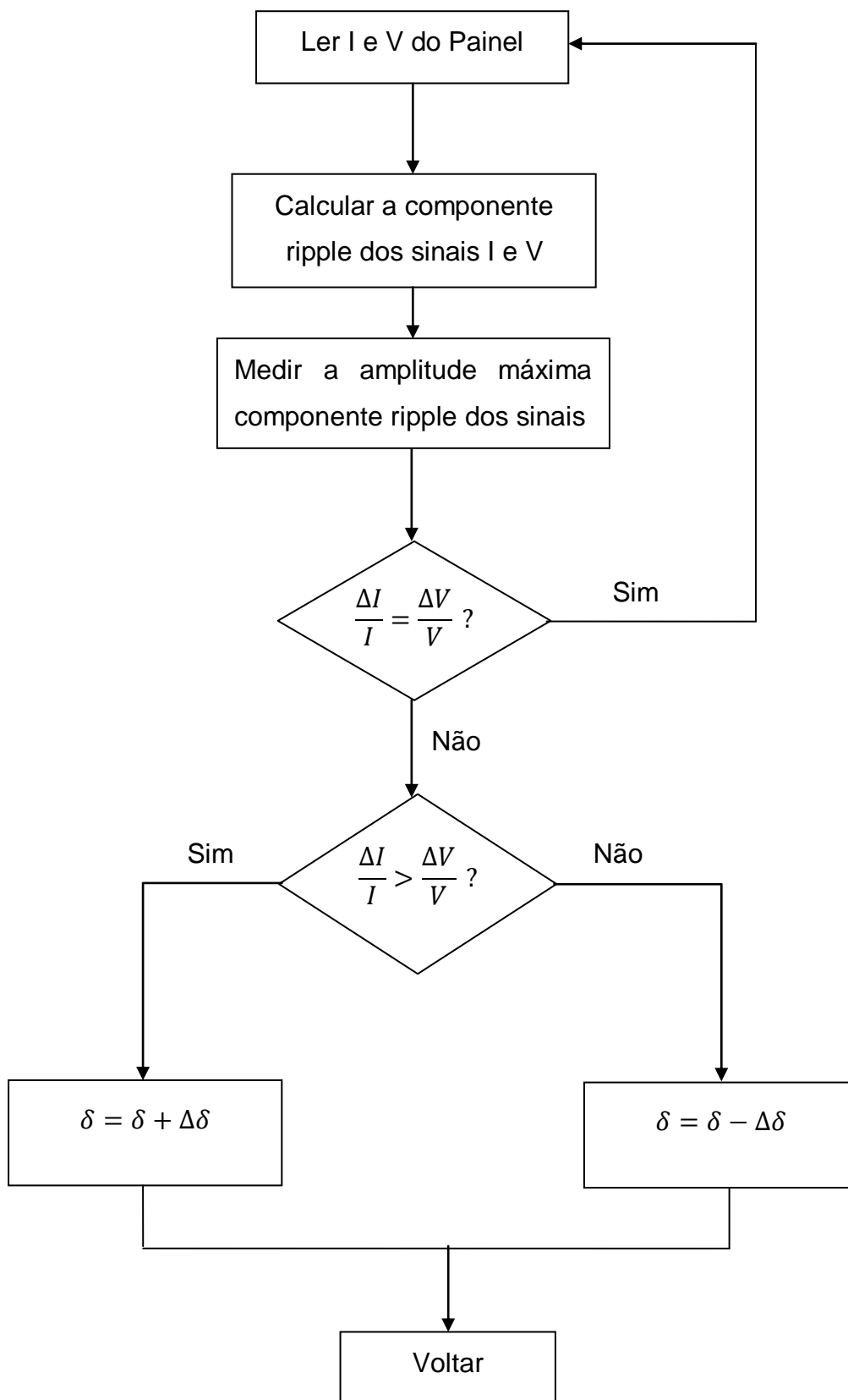
Este método possibilita encontrar o ponto de potência máxima a partir dos valores de corrente e de tensão, lidos directamente do painel fotovoltaico. Em primeiro lugar são lidos os sinais de corrente e tensão. A corrente é lida através do transdutor de corrente LEM LTSR 6-NP e a tensão é lida com o auxílio de divisor de tensão.

Os sinais lidos são compostos por uma componente contínua (DC) e por um componente ripple. Este ripple existe devido às perturbações provocadas pelo funcionamento do conversor boost que está ligado ao painel. O ripple dos sinais é medido com a ajuda de um filtro passa-alto, sendo que posteriormente o ripple é transformado num sinal DC através de um rectificador de onda completa. Desta forma os sinais são formatados de maneira a que possam ser efectuadas as operações necessárias para encontrar o ponto de potência máxima de funcionamento do painel.

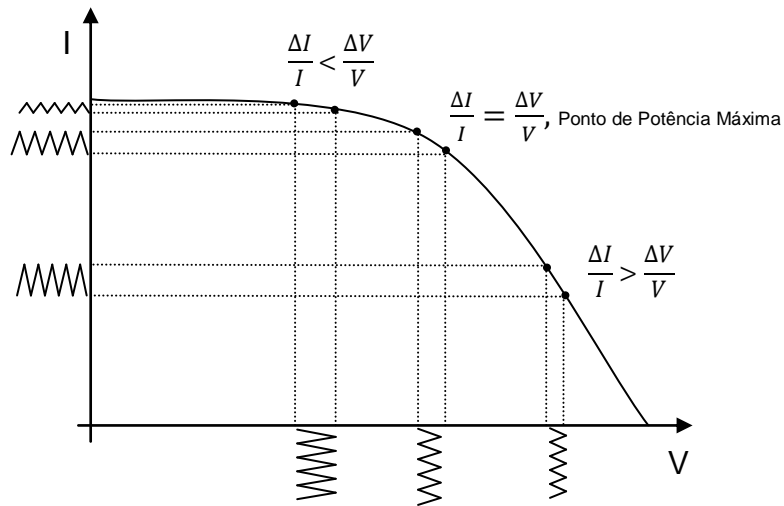
De seguida calcula-se  $\frac{\Delta I}{I}$  e  $\frac{\Delta V}{V}$ , que são os sinais ripple divididos pelos respectivos sinais de corrente e de tensão. Estes valores são comparados e no caso de painel não estar a funcionar no ponto de potência máxima o valor do duty-cycle ( $\delta$ ) será modificado no sentido de colocar o painel fotovoltaico a funcionar nesse ponto.

Se  $\frac{\Delta I}{I} > \frac{\Delta V}{V}$ , o duty-cycle ( $\delta$ ) é incrementado e caso  $\frac{\Delta I}{I} < \frac{\Delta V}{V}$ , o duty-cycle ( $\delta$ ) será decrementado. Em qualquer das situações o objectivo é a aproximação ao ponto de potência máxima do painel fotovoltaico. Chegado o fim do processo, este é reiniciado de forma a garantir uma busca permanente do ponto ideal de funcionamento.





**Figura 4.2:** Algoritmo MPPT Implementado

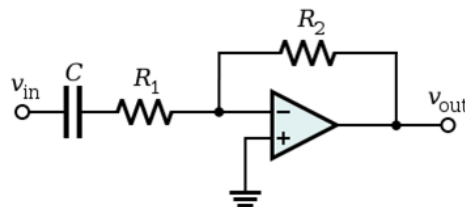


**Figura 4.3:** Curva característica do painel fotovoltaico com indicação do ripple para diferentes pontos de funcionamento.

A implementação prática do algoritmo de busca do ponto de potência máxima (MPPT) foi efectuada com a ajuda do microcontrolador PIC18F4620.

## Dimensionamento do filtro passa – alto e do rectificador de onda completa

O filtro passa – alto escolhido está representado na figura seguinte.



**Figura 4.4:** Topologia do filtro passa – alto activo

A frequência de corte deste filtro é:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{1}{2\pi R_1 C} \quad (4.1)$$

Neste caso como a frequência do sinal é 20 kHz, que é o valor da frequência de comutação do Mosfet do conversor boost, considera-se uma frequência de corte de 18 kHz.

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_1 C} \Leftrightarrow 18kHz = \frac{1}{2\pi R_1 C} \Leftrightarrow R_1 C = \frac{1}{2\pi \times 18 \times 10^3} = 8,84 \times 10^{-6}$$

Portanto considera-se que,

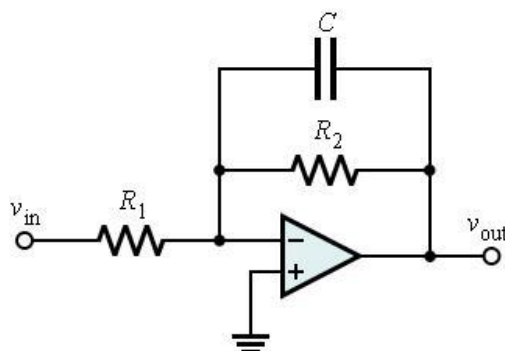
$$R_1 = 1 \text{ k}\Omega$$

$$C = 8,84 \text{ nF}$$

Sabe-se que o ganho do filtro é dado por  $\frac{R_2}{R_1}$ , logo neste caso como se pretende um ganho igual a 1, tem-se  $R_2 = R_1$ .

$$R_2 = 1 \text{ k}\Omega$$

À saída do filtro passa – alto está o ripple do sinal de entrada, que é um sinal AC. No entanto existem parâmetros parasitas associados ao circuito do conversor boost que provocam o aparecimento de ruído, o que pode provocar erros de leitura dos sinais ripple. Para minimizar os efeitos do ruído é utilizado um filtro passa-baixo com uma frequência de corte de 30 kHz, visto que o ripple tem uma frequência de 20 kHz.



**Figura 4.5:** Topologia do filtro passa – baixo activo

A frequência de corte deste filtro é:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_2 C} \quad (4.2)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_2 C} \Leftrightarrow 30\text{kHz} = \frac{1}{2\pi R_2 C} \Leftrightarrow R_2 C = \frac{1}{2\pi \times 30 \times 10^3} = 5,3 \times 10^{-6}$$

Portanto considera-se que,

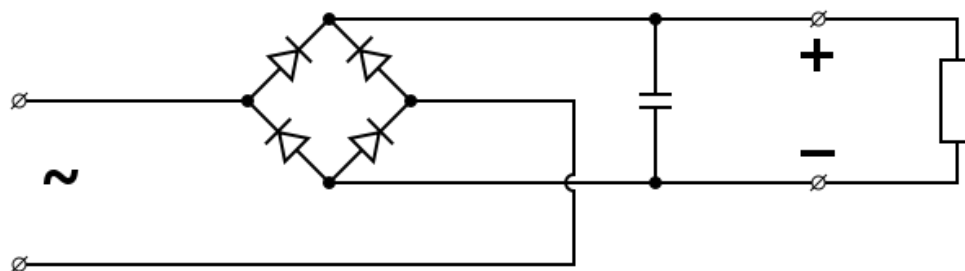
$$R_2 = 1\text{ k}\Omega$$

$$C = 5,3\text{ nF} (5,1\text{ nF} + 0,2\text{ nF})$$

Como não são fabricados condensadores de 5,3 nF, na prática são utilizados dois condensadores em paralelo, um de 5,1 nF e outro de 0,2 nF.

Como se pretende um ganho unitário,  $R_1 = 1\text{ k}\Omega$ .

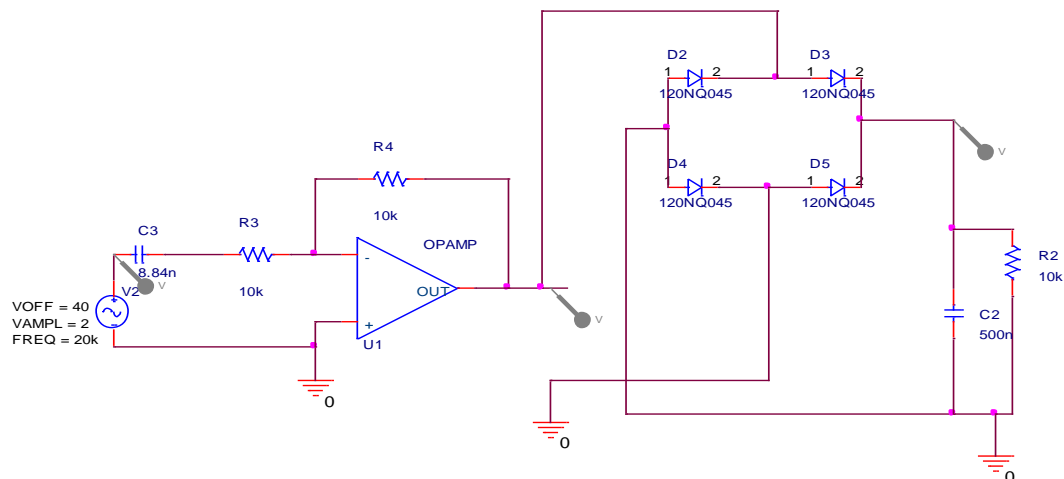
Contudo este sinal necessita ser transformado num sinal DC, para que possa ser inserido no PIC. Portanto, à saída do filtro passa-baixo está um rectificador de onda completa em ponte que efectua a transformação AC – DC do sinal.



**Figura 4.6:** Rectificador de onda completa em ponte

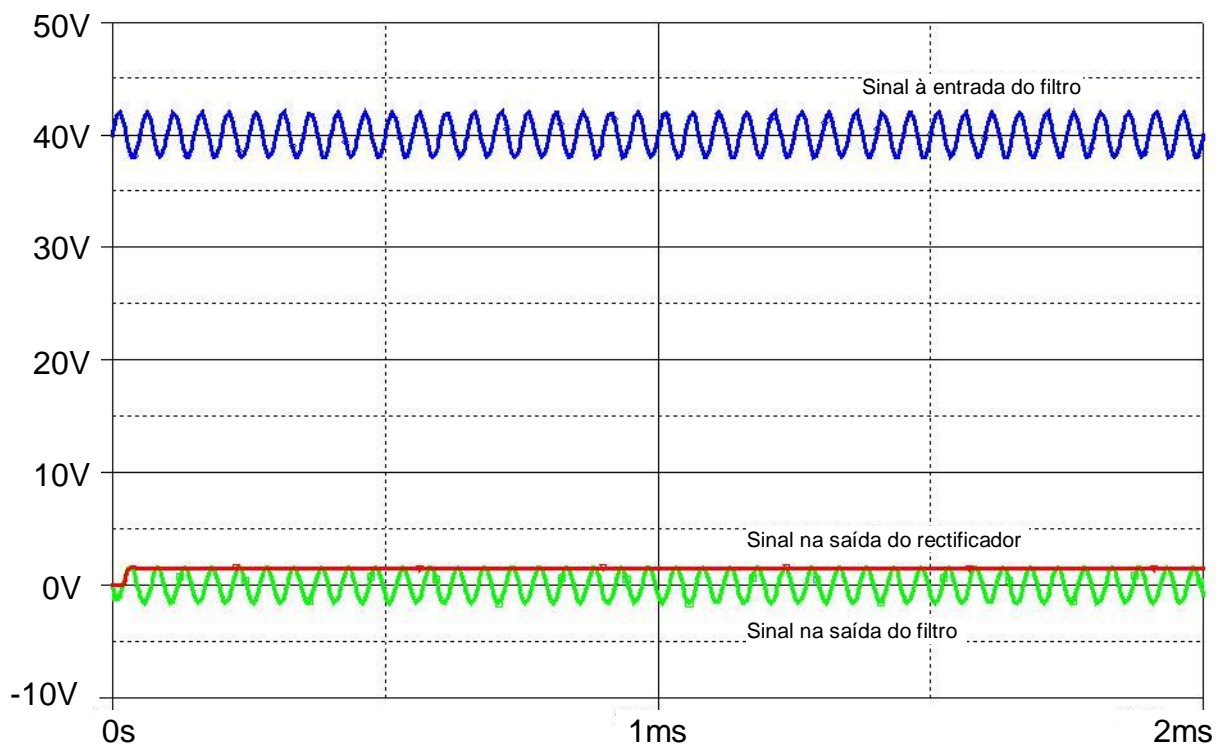
Para testar o funcionamento do filtro passa – alto e do rectificador de onda completa em ponte, foi efectuada uma simulação no programa OrCAD 16.0 Capture.

O circuito simulado está representado na figura 4.7.



**Figura 4.7:** Circuito composto por um filtro passa – alto e por um rectificador de onda completa em ponte, simulado no OrCAD 16.0 Capture.

Os resultados da simulação são os seguintes:



**Figura 4.8:** Resultados da simulação do circuito representado na figura 4.7.

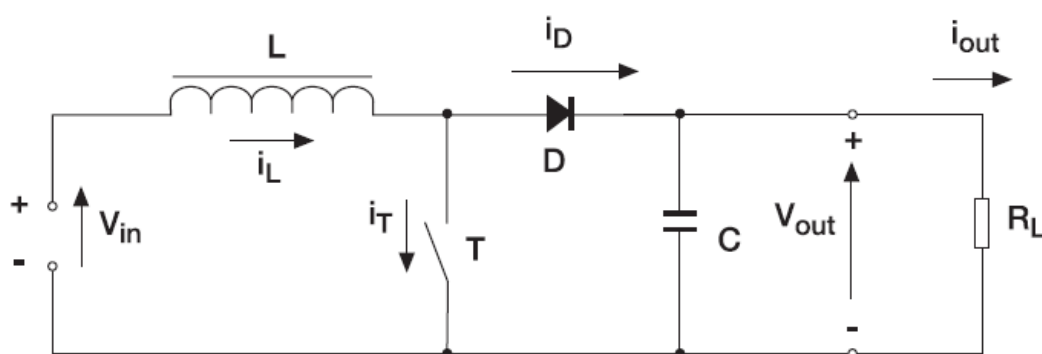
Como se pode verificar, nos resultados da simulação, o circuito projectado cumpre o objectivo a que estava proposto. Na figura 4.8 em cima está representado o sinal à entrada do filtro, que é sinal composto por uma componente DC e uma componente AC (a componente AC representa o ripple). Este é o sinal que representa a saída do painel fotovoltaico.

Na figura 4.8 em baixo está o sinal à saída do filtro. Este sinal apenas possui componente AC, pois a componente DC já foi eliminada pelo filtro.

Finalmente, pode observar-se o sinal na saída do rectificador de onda completa. Este é um sinal contínuo que quantifica o ripple do sinal inicial, permitindo assim a leitura por parte da PIC.

### 4.1.2 Dimensionamento do Conversor Boost

Como tensão à saída do painel fotovoltaico é relativamente baixa, escolheu-se um conversor boost para que a saída apresente uma tensão mais elevada.



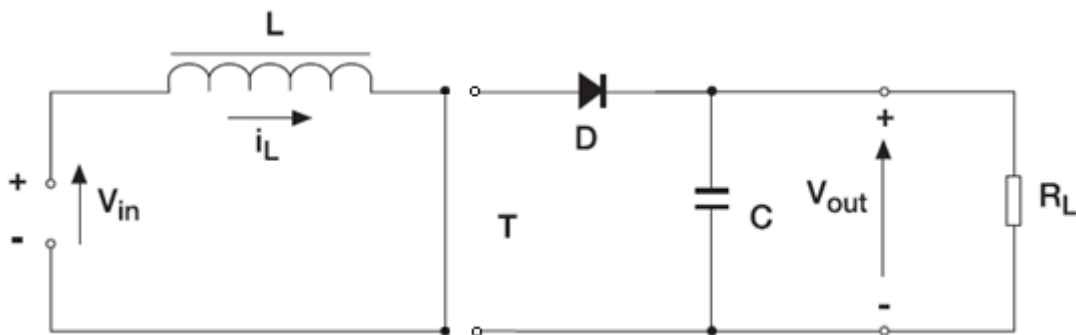
**Figura 4.9:** Conversor Boost

O funcionamento do circuito do conversor boost está dividido em duas etapas. A primeira etapa é quando o interruptor está ligado (transístor está a conduzir), como se pode ver na figura 4.10 Durante este período a corrente circula pela bobina e pelo transístor, sendo acumulada energia na bobina. A segunda etapa acontece quando

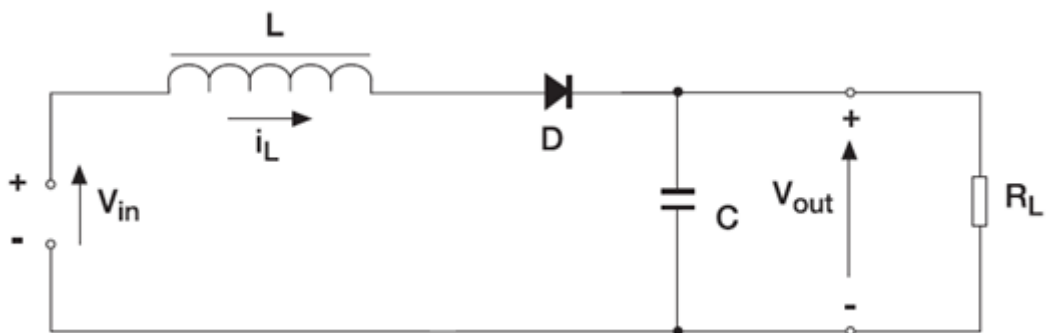
o interruptor está desligado (transistor não conduz), como mostra a figura 4.11. Nesta fase a corrente flui pela bobina, pelo diodo, pelo condensador e pelo resistor de carga. A corrente diminui até que o interruptor seja novamente ligado no ciclo seguinte, sendo que a energia armazenada na bobina é transferida para a carga. No entanto a tensão de saída é maior que a tensão de entrada. A tensão de saída pode ser calculada pela seguinte fórmula:

$$V_{out} = \frac{1}{1 - \delta} V_{in}$$

Onde  $V_{out}$  é a tensão de saída,  $\delta$  é o duty-cycle e  $V_{in}$  é a tensão de entrada que neste caso é a tensão do painel fotovoltaico.



**Figura 4.10:** Diagrama do circuito do conversor boost quando o interruptor está ligado



**Figura 4.11:** Diagrama do circuito do conversor boost quando o interruptor está desligado

### Parâmetros necessários para o dimensionamento do conversor boost:

Tensão de saída:  $V_{out} = 100 \text{ V}$

Potência de saída:  $P_{out} = 40 \text{ W}$

Valor escolhido para a frequência de comutação do Mosfet:  $F = 20 \text{ kHz}$ , logo  $T = 50 \mu\text{s}$

A indutância mínima para que o conversor boost opere no modo de condução contínua, considerando  $R_L = 10 \Omega$ , é obtida pela seguinte equação [16]:

$$L_{min} = \frac{(1-\delta)^2 \delta R_L}{2f} = \frac{(1-0,333)^2 \times 0,333 \times 10}{2 \times 20000} = 37 \mu\text{H} \quad (4.2)$$

Considera-se  $\delta = 0,333$ , pois é para este valor do duty-cycle que ocorre o valor máximo de  $L_{min}$ .

Na prática, valor do duty-cycle não ultrapassa 0,75, portanto o valor do condensador, para garantir um ripple de tensão de 5%, é obtido pela seguinte equação [16]:

$$C_{min} = \frac{\delta}{RfV_r} = \frac{0,75}{10 \times 20000 \times 0,05} = 75 \mu\text{F} \quad (4.3)$$

Onde  $V_r = \frac{\Delta V_{out}}{V_{out}}$ , é o factor de ripple da tensão de saída.

Na situação de potência máxima retirada do painel fotovoltaico, sabe-se que  $I = 0,9 \text{ A}$  e  $V_{in} = 44,8 \text{ V}$  e portanto o duty-cycle é:

$$\delta = \frac{V_{out} - V_{in}}{V_{out}} = \frac{100 - 44,8}{100} = 0,552 = 55,2\% \quad (4.4)$$

### **Seleccção do Mosfet:**

No processo de escolha do Mosfet deve ter-se em conta a tensão e corrente de entrada e também o balanço entre as perdas por condução e as perdas durante a comutação.



A título de exemplo foi escolhido um transistor que fosse compatível com as características deste conversor, para demonstrar os cálculos que podem ser efectuados para determinar as perdas no transistor. Deste modo foi escolhido o Mosfet IRF7494, do fabricante International Rectifier, com as seguintes características:

Tensão Drain-Source ( $V_{DS}$ ): 150 V

$R_{DS(ON)}$ : 44 m $\Omega$

Corrente em Drain ( $I_D$ ): 5,2 A

### **Perdas no Mosfet:**

Perdas na condução, para situação de potência máxima retirada do painel fotovoltaico:

Considerando que o painel fotovoltaico está a funcionar do ponto de potência máxima,  $I = 0,9$  A e portanto o valor das perdas instantâneas de condução do Mosfet é:

$$P_{cond} = I^2 \times R_{DS(ON)} = 0,9^2 \times 0,044 = 0,0356 = 35,6 \text{ mW} \quad (4.5)$$

Perdas durante a passagem à condução:

$$P_{Tr.cond} = \frac{I \times V_{DS} \times T_r \times F}{2} = \frac{0,9 \times 44,8 \times 13 \times 10^{-9} \times 20 \times 10^3}{2} = 0,0052 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow P_{Tr.cond} = 5,2 \text{ mW} \quad (4.6)$$

Perdas durante a passagem ao corte:

$$P_{Tr.corte} = \frac{I \times V_{DS} \times T_f \times F}{2} = \frac{0,9 \times 44,8 \times 14 \times 10^{-9} \times 20 \times 10^3}{2} = 0,0056 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow P_{Tr.corte} = 5,6 \text{ mW} \quad (4.7)$$

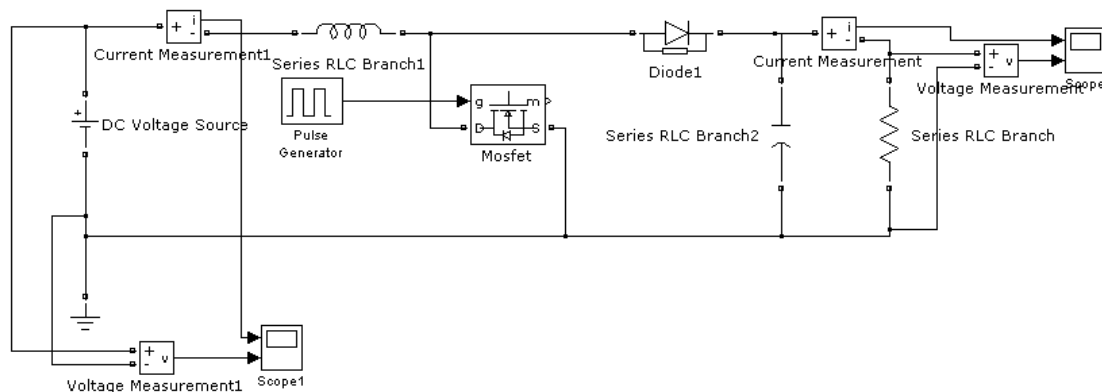
E portanto as perdas totais no mosfet são de 46,4 mW

### Gate Driver do Mosfet:

Como a PIC não possui capacidade de fornecer a potência necessária para o funcionamento correcto do Mosfet, é essencial utilizar um circuito driver ligado à gate do Mosfet. O circuito driver utilizado pode ser um dos circuitos integrados que existem no mercado para esse efeito.

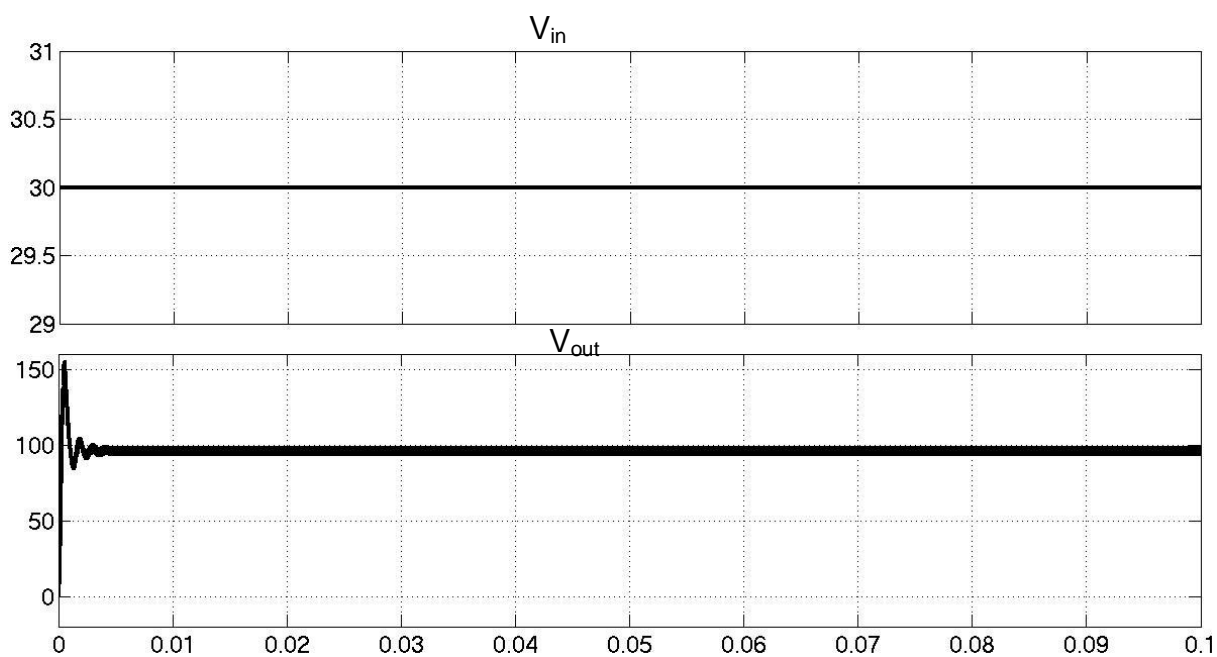
### 4.1.3 Simulação do Conversor Boost em Matlab

Foi efectuada uma simulação do circuito do conversor boost de forma a confirmar o dimensionamento realizado.

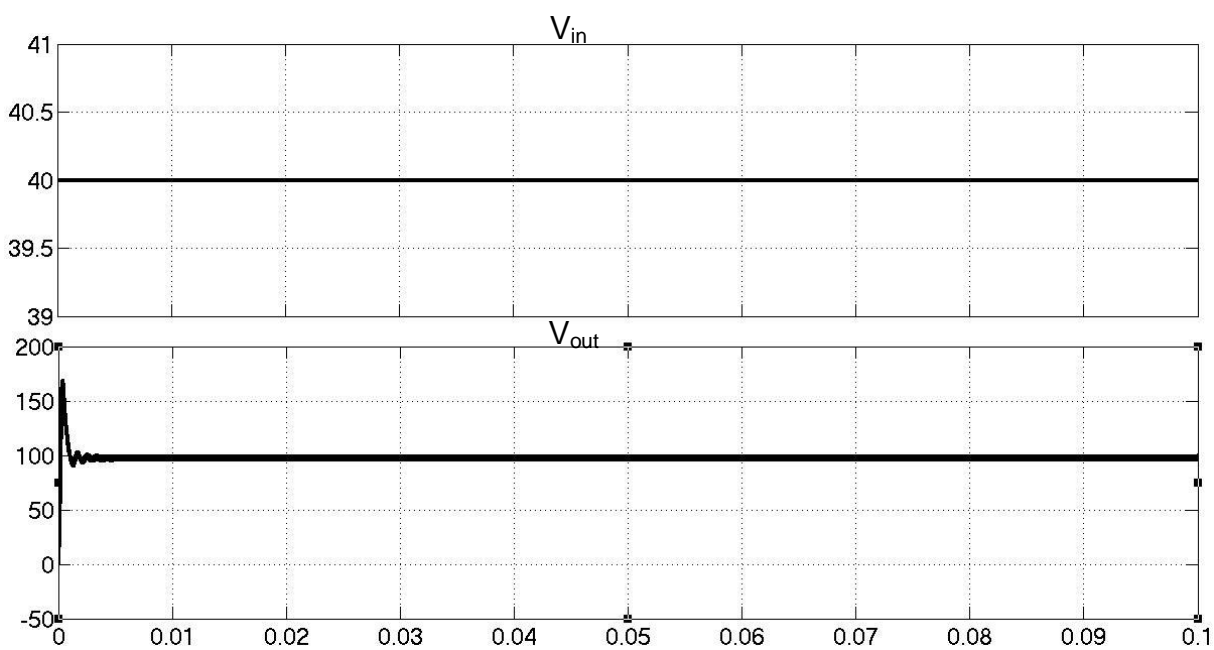


**Figura 4.12:** Conversor Boost simulado em Matlab

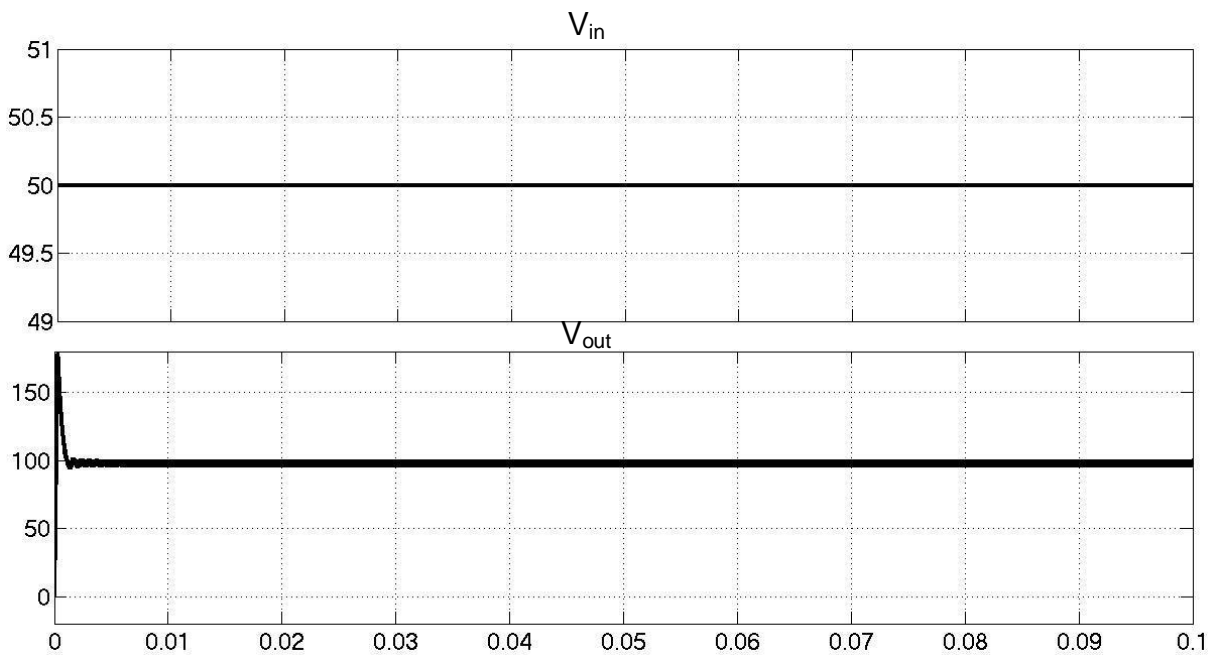
Foram efectuadas simulações para diferentes valores de tensão de entrada e de duty-cycle, de forma a demonstrar o dimensionamento efectuado. Os valores escolhidos para tensão de entrada, são valores próximos dos valores de tensão de saída do painel fotovoltaico.



**Figura 4.13:** Resultado da simulação para  $V_{in} = 30V$  e  $\delta = 0,7$



**Figura 4.14:** Resultado da simulação para  $V_{in} = 40V$  e  $\delta = 0,6$

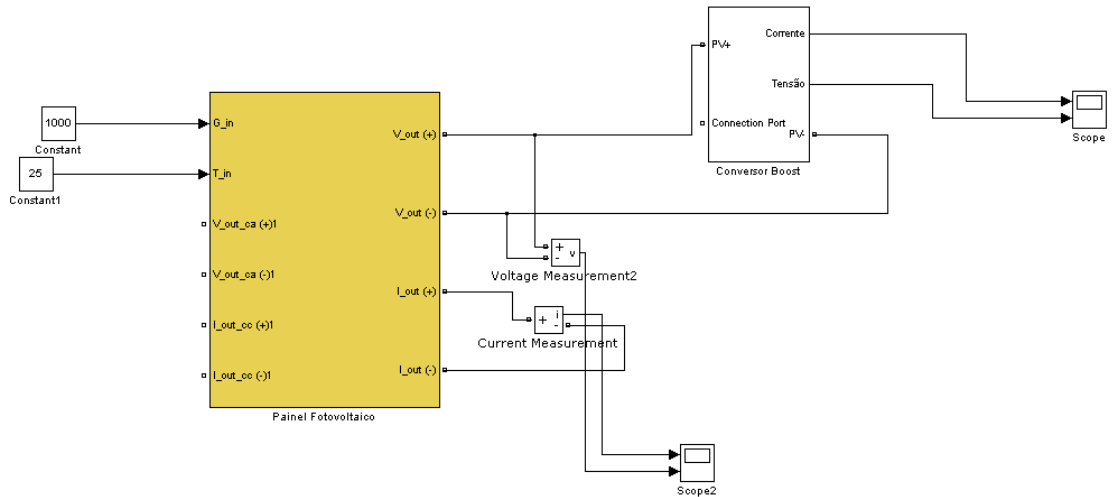


**Figura 4.15:** Resultado da simulação para  $V_{in} = 50V$  e  $\delta = 0,5$

Para diferentes tensões de entrada e diferentes valores de duty-cycle, como se pode verificar pelas figuras anteriores, o conversor boost dimensionado consegue colocar na saída uma tensão de 100Vdc. Deste modo pode-se concluir que o conversor boost cumpre o objectivo proposto.

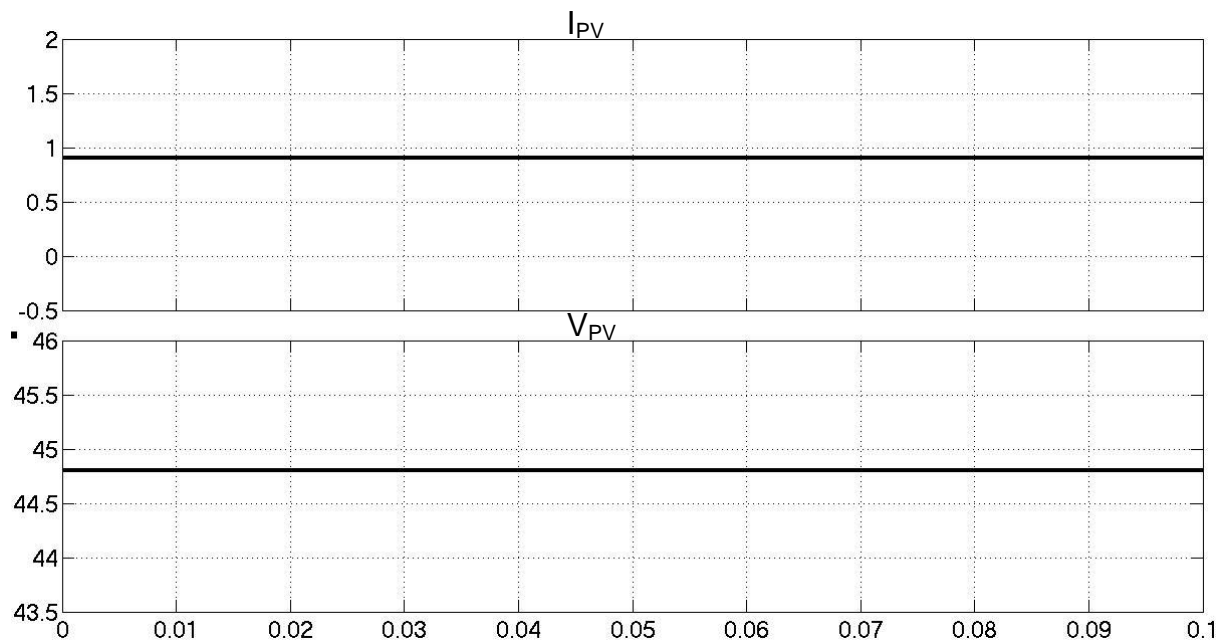
#### 4.1.4 Simulação do Conversor Boost Ligado ao Painel Fotovoltaico

Para simular o conversor boost ligado ao painel fotovoltaico, foi utilizado um modelo do painel fotovoltaico feito em Matlab/Simulink. Este modelo tem as características do painel fotovoltaico Bangkok Solar – BS 40, que já foram especificadas no capítulo 3. A simulação foi efectuada para valores ideais de temperatura e radiação solar, ou seja, 25°C e 1000 W/m<sup>2</sup>.



**Figura 4.16:** Modelo do painel fotovoltaico ligado ao conversor boost

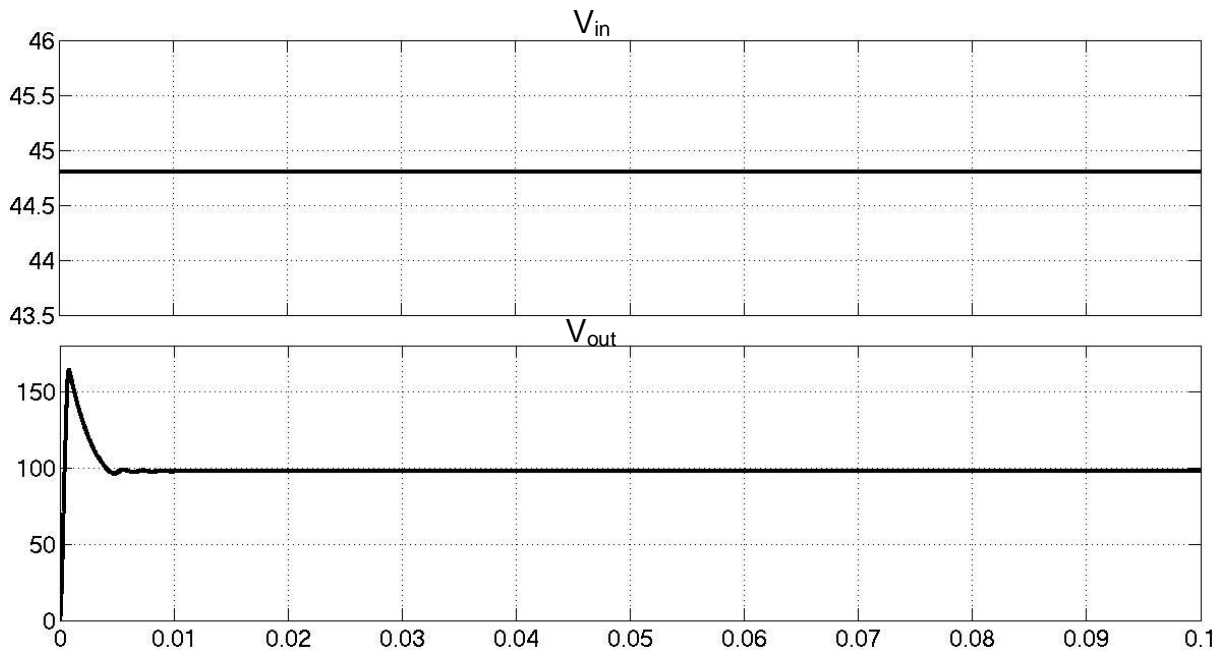
Foram medidos os valores da tensão e corrente à saída do modelo do painel fotovoltaico apenas para verificar se o painel se comporta como é esperado para condições ideais de radiação solar e temperatura, como mostra a figura 4.17.



**Figura 4.17:** Tensão (em baixo) e corrente (em cima) à saída do painel fotovoltaico

Analisando a figura 4.17, verifica-se que os valores de tensão e corrente estão em consonância com as especificações fornecidas pelo fabricante, isto é, uma corrente de 0,9 A e uma tensão de 44,8 V.

Na figura 4.18 pode observar-se o valor da tensão na entrada e na saída do conversor boost.



**Figura 4.18:** Tensão à entrada (em cima) e à saída (em baixo) do conversor boost

Como se pode observar nas figuras **4.13**, **4.14**, **4.15** e **4.18**, existe um pico inicial de tensão na saída do conversor boost. Isto ocorre devido aos parâmetros de simulação do Simulink.

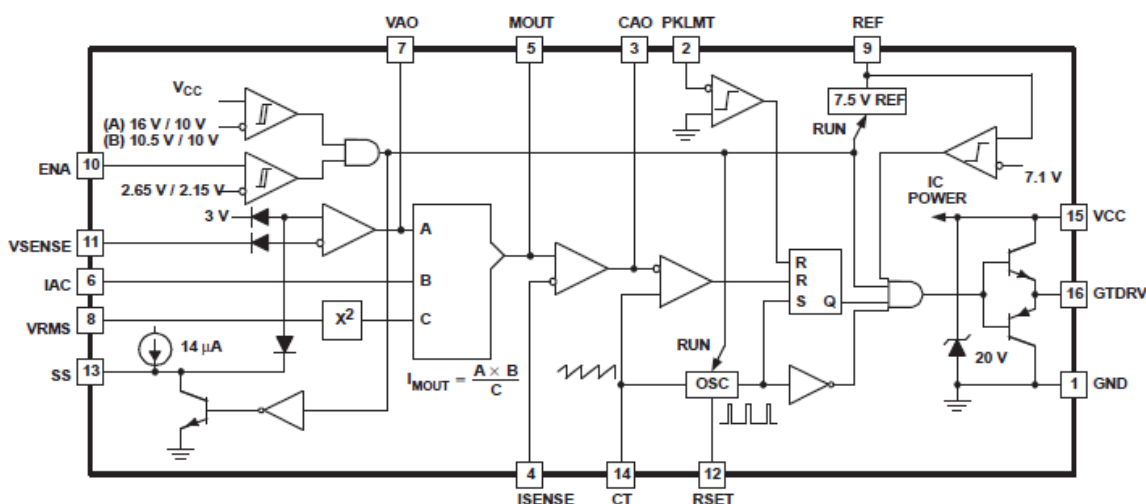
O Simulink modela o sistema através de equações diferenciais. Quando se inicia a simulação, o Simulink resolve o conjunto de equações diferenciais que modelam o sistema utilizando um dos seus algoritmos de resolução.

Portanto o tipo de algoritmo utilizado, o tamanho do passo da simulação e vários parâmetros de tolerância afectam os resultados obtidos.

Neste caso em concreto devido à utilização de elementos passivos no circuito do conversor boost, os resultados são influenciados pelos vários parâmetros de configuração que provocam algumas oscilações no início da simulação.

## 4.2 Modulação Sinusoidal

Neste bloco é feita a conversão corrente – contínua / corrente – alternada. Para este efeito é utilizado um circuito integrado do fabricante Unitrode, mais precisamente o UC2854A/B.



**Figura 4.19:** Diagrama de blocos internos do circuito UC2854A/B

Originalmente este circuito está pensado para corrigir o factor de potência. A partir da obtenção da forma de onda da corrente de entrada, faz com que a forma de onda da tensão siga a da corrente, e desta forma consegue alcançar um factor de potência muito próximo de 1.

Neste trabalho o circuito é utilizado de maneira semelhante, contudo a forma de onda da corrente é obtida da rede pública através de um transformador, sendo que o circuito integrado UC2854A/B, produz uma onda sinusoidal rectificada através de um modulador por largura de impulsos (PWM).

## 4.2.1 Entradas de Controle

É utilizado com referência a forma de onda da corrente da rede pública, para criar a onda sinusoidal rectificada. O sinal é introduzido no circuito integrado UC2854A/B através do pino 6 ( $I_{ac}$ ), que é uma das entradas do multiplicador. Como esta é uma entrada de corrente é ligada através de um resistor que retira a forma de onda da rede pública, e o outro resistor é ligado à tensão de referência do circuito integrado. A escolha dos resistores é feita para que a corrente que entra no pino 6 varie de zero (zero da sinusóide) a  $600\mu A$  (pico da sinusóide), que é corrente máxima de entrada do multiplicador.

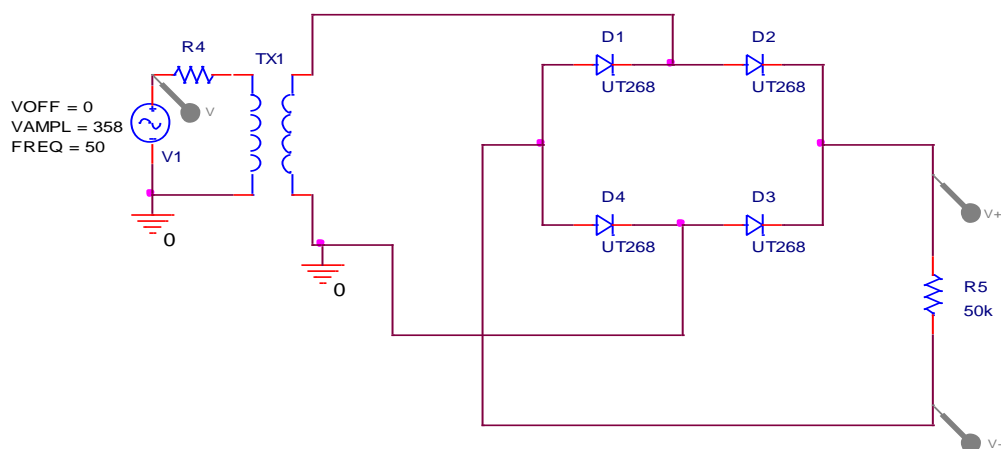
Cálculo dos resistores:

$$R_{AC} = \frac{V_{pico}}{I_{ACpico}} = \frac{30}{600\mu A} = 50k \quad (4.8)$$

$$R_{REF} = \frac{R_{AC}}{4} = \frac{542}{4} = 136k\Omega \quad (4.9)$$

O resistor  $R_{AC}$  liga o pino 6 do circuito integrado à rede pública, através de um rectificador de onda completa em ponte e de um transformador, de maneira a retirar a forma de onda da rede.

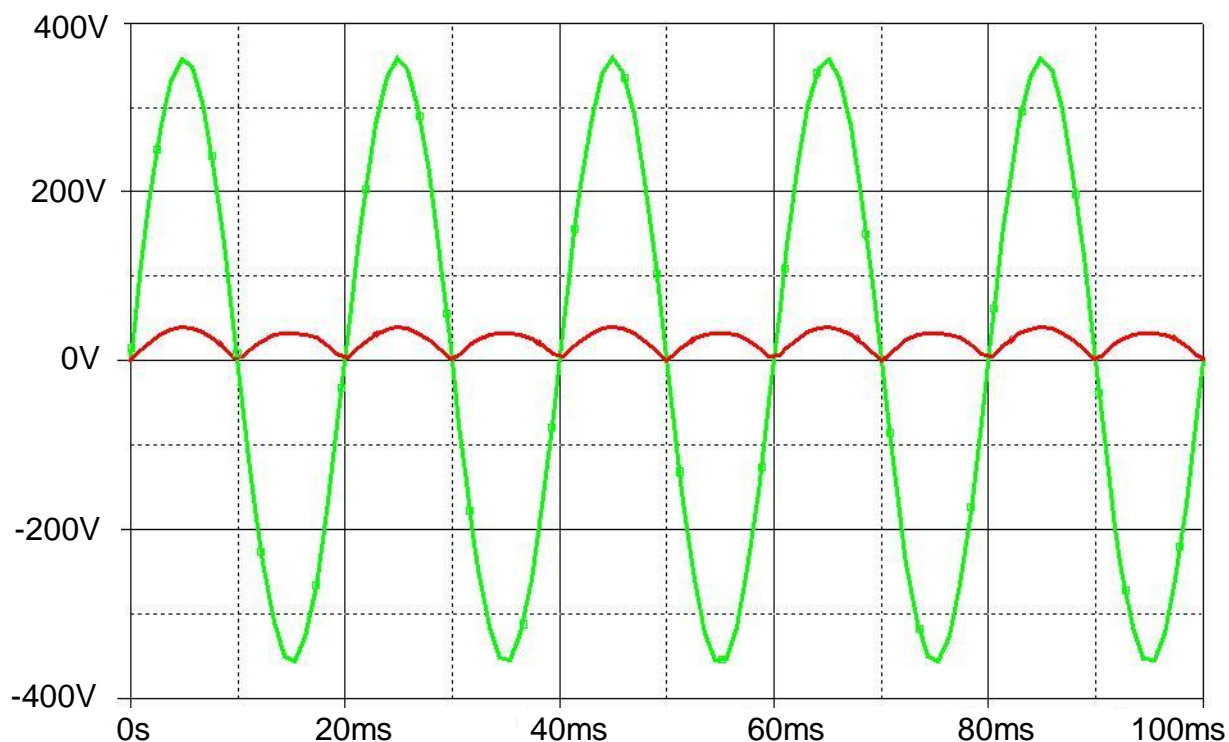
O circuito para retirar a forma de onda da rede pública é o seguinte:



**Figura 4.20:** Circuito rectificador de onda completa com transformador



Deste modo a forma de onda da rede pública é transformada numa onda rectificada com menor amplitude, como se pode observar na figura 4.21. A onda rectificada com menor amplitude é obtida aos terminais do resistor R5 da figura 4.20.



**Figura 4.21:** Simulação do circuito rectificador da figura 4.20: com a cor verde a tensão da rede pública e com a cor vermelha a tensão de referência.

O resistor  $R_{REF}$  liga o pino 6 à tensão de referência do circuito integrado, que é 7,5V.

O pino 11 ( $V_{sense}$ ) é outra entrada do multiplicador que através de um divisor de tensão é ligado à saída do conversor boost. Este sinal serve como indicador da tensão disponível para saber se se pode ou não aumentar a corrente injectada na rede.

Cálculo do divisor de tensão:

Para 100 V de tensão na entrada do modulador sinusoidal deve corresponder a 7,5 V no pino 11 ( $V_{sense}$ ) do circuito integrado, portanto,

$$7,5 = 100 \times \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Logo,

$$R_1 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 100 \times \frac{R_1}{7,5} - R_1 = 123,33 \text{ k}\Omega$$

### Frequência de comutação:

Foi escolhida uma frequência de comutação de 100 kHz. Esta frequência é definida pelos valores do condensador  $C_T$  que liga ao pino 14, e o resistor  $R_{set}$  que liga ao pino 12.

Em primeiro lugar deve ser escolhido o resistor  $R_{set}$ , pois este afecta o valor máximo da corrente na saída do multiplicador de acordo com a equação:

$$I_{MULTmax} = \frac{3,75}{R_{set}} \quad (4.10)$$

Com  $R_{set} = 30 \text{ k}\Omega$ ,  $I_{MULTmax} = 125 \text{ }\mu\text{A}$

Para controlar o modulador por largura de impulsos é utilizado um resistor como sensor. A queda de tensão nesse resistor é aplicada nos pinos 4 e 5, com o auxílio de resistores de 3,9 k $\Omega$ .

Como  $R_{set} = 30 \text{ k}\Omega$  e a frequência do oscilador  $F = 100 \text{ kHz}$ , então o condensador  $C_T$  é calculado da seguinte forma:

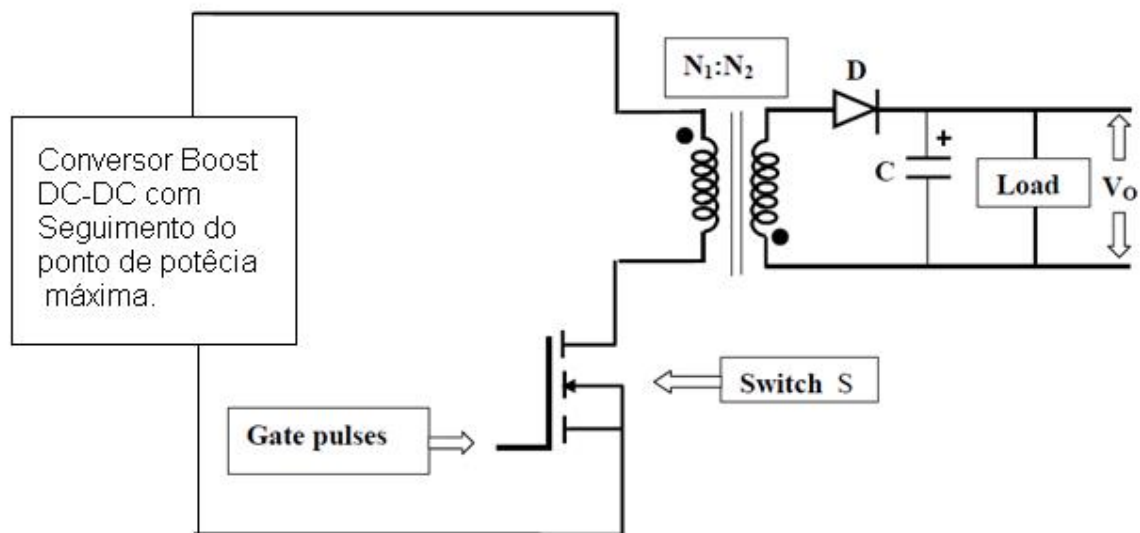
$$C_T = \frac{1,25}{R_{set} \times F} = \frac{1,25}{30 \text{ k}\Omega \times 100 \text{ kHz}} = 417 \text{ pF} \quad (4.11)$$

No pino 16 (GTdrv) do circuito UC2854A/B, está o sinal modulador por largura de impulsos (PWM) que liga à gate do Mosfet do Transformador Flyback.

## 4.2.2 Conversor Flyback

O conversor flyback é circuito SMPS (switched mode power supply) que é normalmente utilizado em aplicações de baixa potência onde a saída necessita ser isolada da entrada, sendo também um circuito relativamente simples e com um baixo custo.

O transformador do conversor flyback funciona de forma diferente de um transformador normal, pois os enrolamentos, primário e secundário, não conduzem corrente em simultâneo. Durante o tempo que o mosfet conduz, o flyback armazena energia no seu núcleo. Posteriormente essa energia é libertada durante o período em que o mosfet está desligado.



**Figura 4.22:** Conversor Flyback

## Dimensionamento do conversor flyback

Ao ser utilizada a topologia flyback garante-se que o conversor fica isolado da rede pública. O conversor flyback converte a tensão de saída do conversor boost numa tensão AC rectificada. O valor instantâneo da tensão rectificada deve ser superior ao valor instantâneo da tensão da rede. Os cálculos efectuados no dimensionamento do conversor flyback são para o regime não lacunar (modo contínuo).

As especificações utilizadas para o dimensionamento do transformador flyback são as seguintes:

$V_{in}$  – Tensão de entrada: 100 V<sub>DC</sub>

$V_{rectificado}$  – Valor de pico da tensão rectificada de saída: 400 V

$f$  – Frequencia de comutação: 100 kHz

Sabendo que,

$$V_{rectificado} = \frac{V_{in} \cdot \delta_{max}}{(1 - \delta_{max})} \cdot \frac{N_2}{N_1} \quad (4.12)$$

Onde,  $\delta_{max}$  é o valor máximo do duty-cycle e  $N_1$  e  $N_2$  são o número de espiras do primário e do secundário.

Sabendo que  $n = \frac{N_1}{N_2}$ , chega-se ao seguinte valor para a relação do número de espiras entre o primário e o secundário:

$$V_{rectificado} = \frac{V_{in} \cdot \delta_{max}}{(1 - \delta_{max})} \cdot \frac{1}{n} \Leftrightarrow n = \frac{V_{in} \cdot \delta_{max}}{V_{rectificado} \cdot (1 - \delta_{max})} = \frac{100 \times 0,75}{400 \times (1 - 0,75)} \cong 0,75$$

Normalmente o rendimento deste tipo de conversores está entre 65% e 75%. Neste caso em concreto foi escolhido o valor de 75%, ou seja,

$$\eta = 0,75$$

Portanto sabe-se que a potência de saída máxima é:

$$P_{out} = P_{in} \times \eta = 40 \times 0,75 = 30 \text{ W} \quad (4.13)$$

Enquanto a corrente máxima de saída é:

$$I_{out} = \frac{P_{out}}{V_{out}} = \frac{30}{400} = 0,075 \text{ A} \quad (4.14)$$

Sabendo que,

$$P_{out} = R_{carga} \cdot I_{out}^2 \quad (4.15)$$

Então,

$$R_{carga} = \frac{P_{out}}{I_{out}^2} = \frac{30}{0,075^2} = 5333,33 \Omega \cong 5,3 \text{ k}\Omega$$

Para um valor de duty-cycle = 0,75, o valor do condensador, para garantir um ripple de tensão de 10%, é obtido pela seguinte equação:

$$C_{min} = \frac{\delta}{RfV_r} = \frac{0,75}{5,3 \times 10^3 \times 100000 \times 0,1} = 1,4 \times 10^{-8} = 14 \text{ nF} \quad (4.16)$$

Onde  $V_r = \frac{\Delta V_{out}}{V_{out}}$ , é o factor de ripple da tensão de saída.

A corrente de pico no interruptor de depende da topologia que se utiliza, neste caso em concreto a expressão para calcular a corrente de pico é:

$$I_{pico} = \frac{5,5 P_{out}}{V_{in}} = \frac{5,5 \times 30}{100} = 1,65 \text{ A} \quad (4.17)$$

A tensão de pico é obtida pela equação:

$$V_{pico} = V_{rectificado} \cdot \frac{N_1}{N_2} + V_{in} = 400 \times 0,75 + 100 = 400 \text{ V} \quad (4.18)$$

A partir dos valores calculados anteriormente, pode-se calcular um valor aproximado para a indutância do enrolamento primário:

$$L_{pri} = \frac{V_{in} \cdot \delta_{max}}{I_{pico} \cdot f} = \frac{100 \times 0,75}{1,65 \times 100 \times 10^3} \cong 455 \mu\text{H} \quad (4.19)$$

Para calcular o número de espiras do enrolamento primário e secundário é necessário escolher o tipo e o material do núcleo do transformador.

A selecção do tipo e tamanho do núcleo tem em conta o diâmetro do fio, o tamanho das cavas e as curvas de magnetização.

Foi escolhido o indutor tipo POT CORE 30x19, do fabricante Siemens, com uma indutância específica  $A_L = 630\text{nH}$ , em que  $A_L$  é calculada pela equação:

$$A_L = \frac{L}{N^2} \quad (4.20)$$

Onde  $L$  é a indutância e  $N$  é o número de espiras da bobina.

Portanto para calcular o número de espiras do primário:

$$N_1 = \sqrt{\frac{L}{A_L}} = \sqrt{\frac{455 \times 10^{-6}}{630 \times 10^{-9}}} = 26,9 = 27 \text{ espiras}$$

Onde  $L$  é a indutância do enrolamento primário.

E portanto para o enrolamento secundário sabe-se que,

$$N_2 = \frac{N_1}{n} = \frac{27}{0,75} = 36 \text{ espiras}$$

Existe também um enrolamento terciário que é utilizado para desmagnetizar o núcleo do transformador.

### **Seleção do Mosfet do transformador flyback:**

Na selecção do mosfet deve ter-se em conta a tensão e corrente de entrada, e também a relação entre as perdas por condução (devido a  $R_{DS(ON)}$ ) e as perdas de comutação.

Deste modo foi escolhido o Mosfet IRFB4019PbF com as seguintes características:

Tensão Drain-Source ( $V_{DS}$ ): 150 V

$R_{DS(ON)}$ : 80 m $\Omega$

Corrente em Drain ( $I_D$ ): 17 A

Tempo de subida ( $T_r$ ): 13 ns

Tempo de descida ( $T_f$ ): 7,8 ns

### **Perdas no Mosfet:**

Na situação de potência máxima:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{40W}{100V} = 0,4A \quad (4.21)$$

Perdas na condução (estimado situação de potência máxima retirada do painel fotovoltaico):

$$P_{cond} = I^2 \times R_{DS(ON)} = 0,4^2 \times 0,08 = 0,0128 = 12,8 \text{ mW} \quad (4.22)$$

Perdas durante a passagem à condução:

$$P_{Tr.cond} = \frac{I \times V_{DS} \times T_r \times F}{2} = \frac{0,4 \times 100 \times 13 \times 10^{-9} \times 100 \times 10^3}{2} = 0,026 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow P_{Tr.cond} = 26 \text{ mW} \quad (4.23)$$

Perdas durante a passagem ao corte:

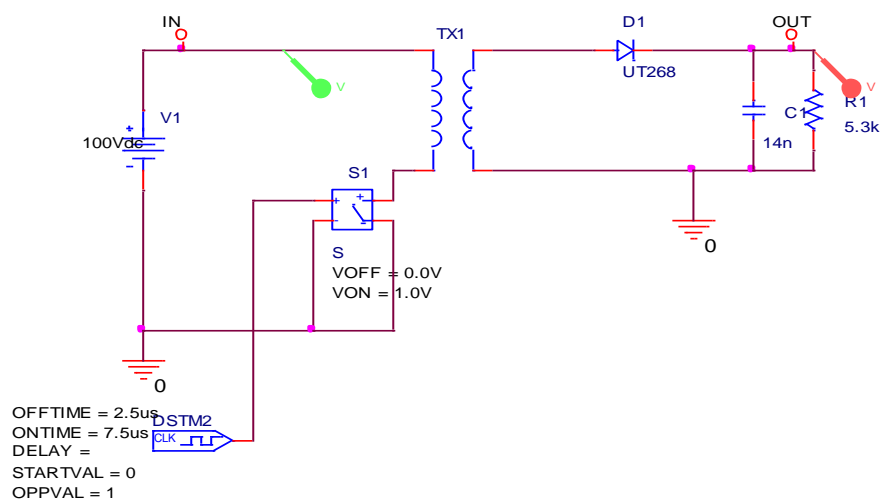
$$P_{Tr.corte} = \frac{I \times V_{DS} \times T_f \times F}{2} = \frac{0,4 \times 100 \times 7,8 \times 10^{-9} \times 100 \times 10^3}{2} = 0,0156 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow P_{Tr.cond} = 15,6 \text{ mW} \quad (4.24)$$

Perdas totais no Mosfet:

As perdas totais no Mosfet são de 54,4 mW

## Simulação do conversor flyback

De forma a verificar o funcionamento do conversor flyback, foi efectuada uma simulação do circuito da figura 4.23. O Mosfet foi substituído por um interruptor, de modo a tornar mais simples o processo de simulação.



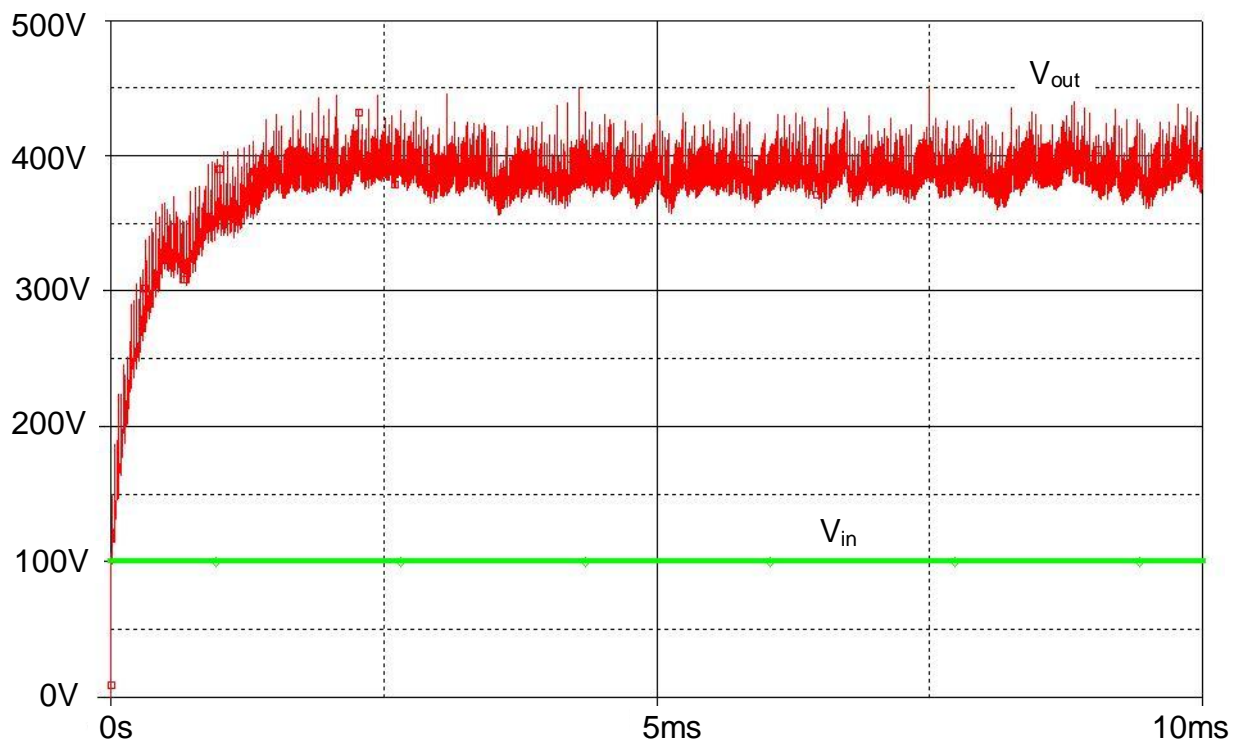
**Figura 4.23:** Circuito utilizado na simulação do conversor Flyback

Os resultados da simulação podem ser observados na figura 4.24. Verifica-se que para uma tensão de entrada de 100Vdc, obtém-se na saída uma tensão de aproximadamente 400V.

Na figura 4.24 está representada a tensão na saída ( $V_{out}$ ) e a tensão de entrada ( $V_{in}$ ) do conversor Flyback.

Verifica-se então, pela observação da figura 4.24, que o conversor Flyback cumpre as especificações pretendidas, ou seja produz uma tensão na saída de 400V( $\pm 10\%$ ).



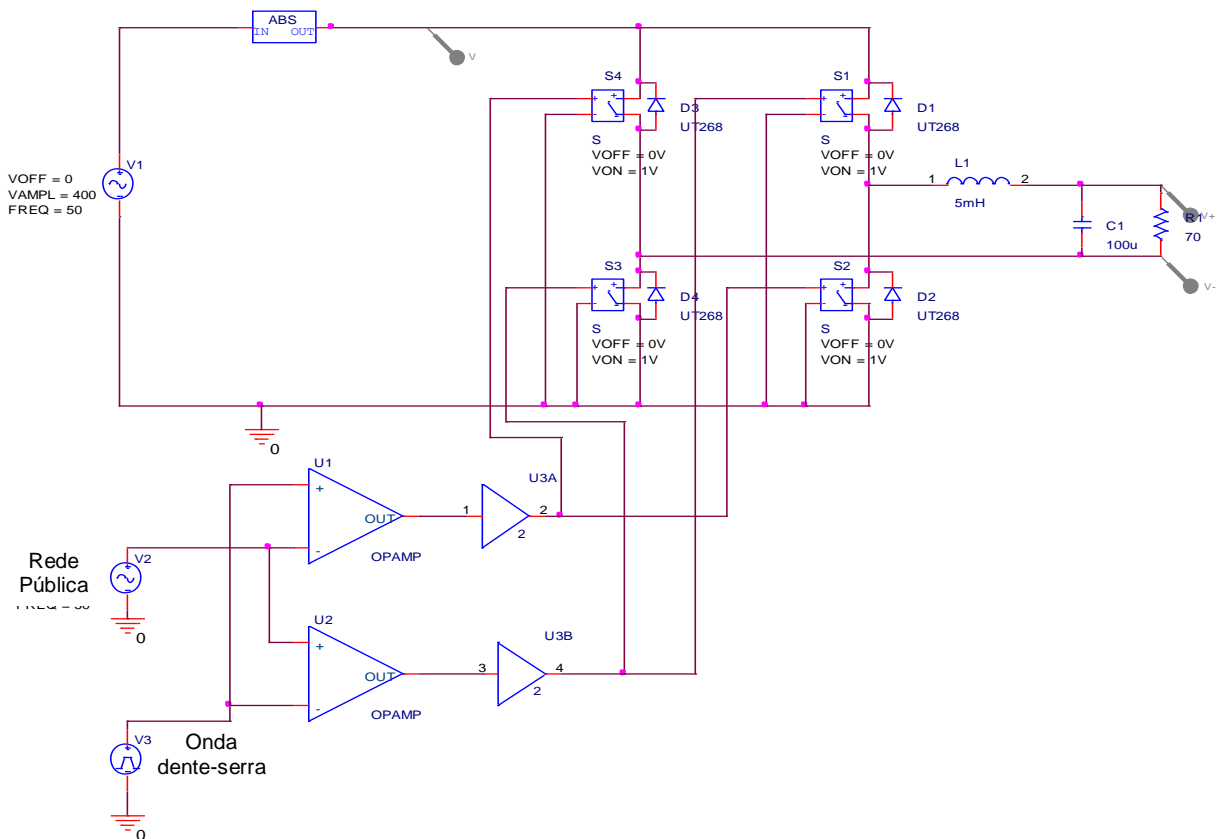


**Figura 4.24:** Resultados da simulação do conversor Flyback. Tensão de entrada ( $V_{in}$ ) e tensão de saída ( $V_{out}$ ).

Observando a figura 4.24, verifica-se que a tensão de saída ( $V_{out}$ ) apresenta algumas oscilações que estão relacionadas com os parâmetros de simulação utilizados. No entanto mesmo considerando as oscilações, o conversor consegue cumprir as especificações pretendidas, alcançando assim o objectivo a que estava proposto.

### 4.3 Ponte Inversora de Saída

A ponte inversora de saída tem como função transformar a onda sinusoidal rectificada, gerada pelo circuito integrado UC2854A/B, numa onda sinusoidal completa compatível com a rede pública.



**Figura 4.25:** Circuito de simulação da ponte Inversora de saída em OrCAD 16.0  
Capture

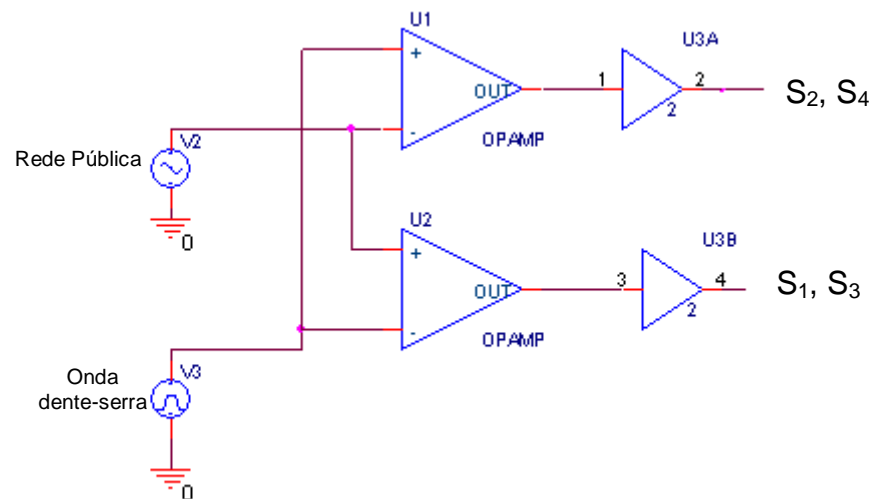
Para desdobrar a sinusóide rectificada são utilizados quatro interruptores (FETs) ligados entre si e sincronizados com a rede pública.

#### Controlo da ponte inversora:

O controlo da ponte é feito comparando a forma de onda da rede pública com uma onda em forma de dente-serra utilizando dois AmpOp's. Assim são criados os sinais

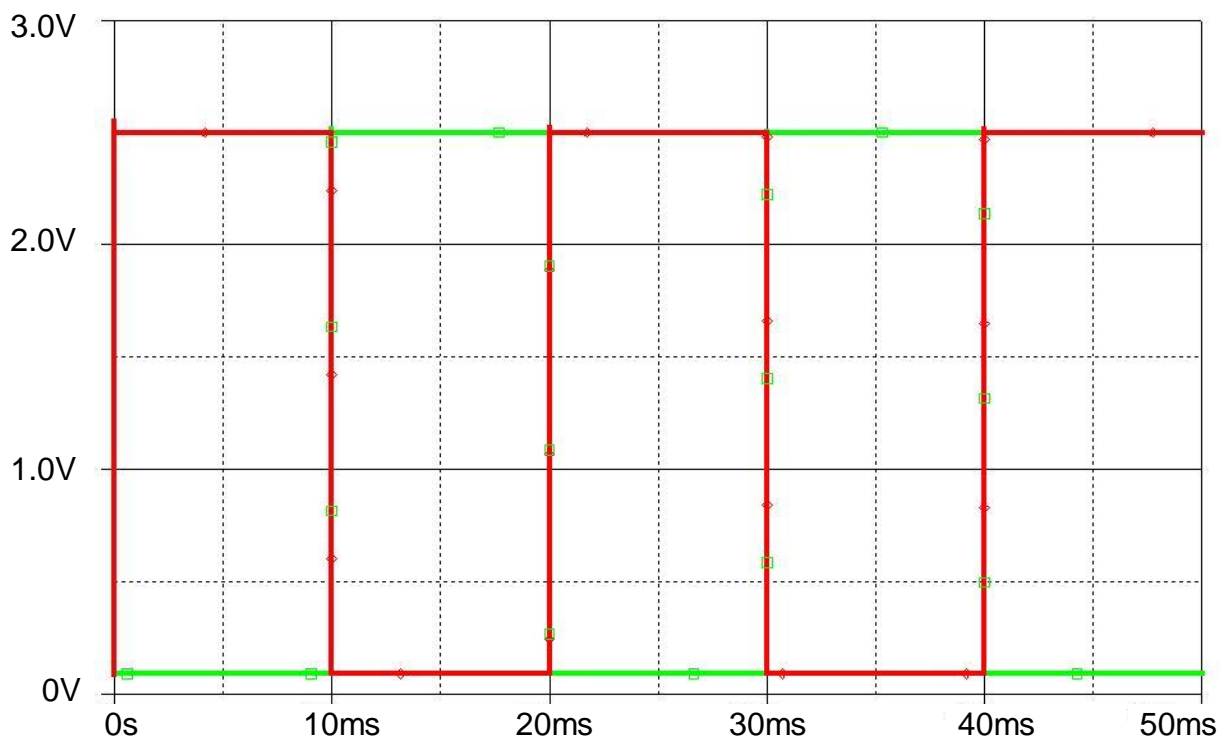
de controlo para cada um dos quatro interruptores. São criados dois sinais de controlo, um para quando a tensão da rede é positiva e outro para quando é negativa.

Quando a tensão da rede pública tem um valor positivo, são activados os interruptores  $S_1$  e  $S_3$ , e quando é negativo são activados os interruptores  $S_2$  e  $S_4$ .

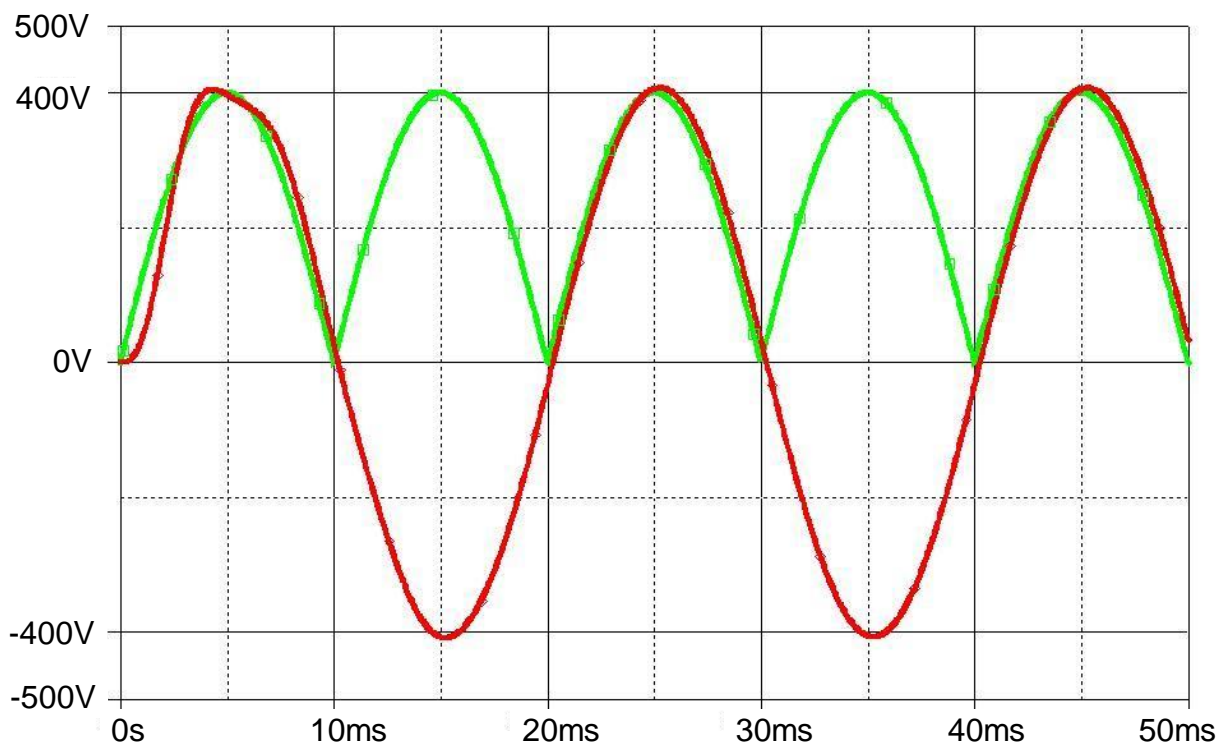


**Figura 4.26:** Circuito de simulação do controlo da ponte inversora em OrCAD 16.0  
Capture

Na figura 4.27 pode ver-se, a vermelho, o sinal de controlo que activa os interruptores  $S_1$  e  $S_3$ . Com a cor verde está o sinal que activa os interruptores  $S_2$  e  $S_4$ .



**Figura 4.27:** Simulação do circuito de controlo da ponte inversora



**Figura 4.28:** Simulação da ponte inversora de saída

Como se pode observar na figura 4.28, na entrada da ponte inversora está a onda sinusoidal rectificada que vem do conversor flyback. Na saída do circuito da ponte está a onda sinusoidal já completa.

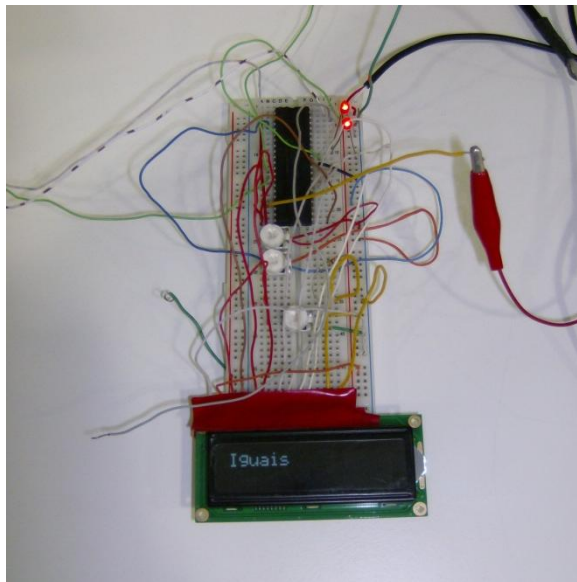


## Capítulo 5 - Teste do Algoritmo MPPT Desenvolvido

---

Para testar o algoritmo MPPT implementado foi efectuada uma montagem, onde foi utilizado o seguinte material:

- 1 PIC18F4620
- 3 Potenciómetros
- 2 Leds
- 1 Display GDM1602K
- Osciloscópio
- Fios condutores



**Figura 5.1:** Montagem efectuada para teste do algoritmo

Esta montagem de teste tem como principal objectivo verificar o duty-cycle gerado pela PIC18F4620, bem como a respectiva variação de acordo com as variáveis de entrada.

A linguagem ASSEMBLY, sendo uma linguagem de baixo nível, actua directamente nos registos. Desta forma torna-se um trabalho muito complexo e com maior probabilidade de ocorrência de erros. Assim para programar a PIC utilizou-se a linguagem de programação C que possibilita a utilização de bibliotecas fornecidas pela Microchip. Estas bibliotecas contêm funções que permitem efectuar praticamente todas as operações necessárias para programar o algoritmo de busca do ponto de potência máxima.

De forma a simplificar os processos durante o teste, foram apenas colocadas duas variáveis de entrada,  $\frac{\Delta I}{I}$  e  $\frac{\Delta V}{V}$ . São utilizados dois potenciômetros que fazem variar as entradas de 0V a 5V.

A finalidade desta montagem é observar a variação do duty-cycle de acordo com as seguintes condições:

- Se  $\frac{\Delta I}{I} > \frac{\Delta V}{V}$ , o duty-cycle aumenta.
- Se  $\frac{\Delta I}{I} < \frac{\Delta V}{V}$ , o duty-cycle diminui.
- Se  $\frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta V}{V}$ , o duty-cycle mantém-se igual.

A frequência de amostragem, com base no teorema de Nyquist, deve ser maior que o dobro da frequência contida no sinal a ser amostrado, para que possa ser reproduzido totalmente sem erro de aliasing. Como o ripple tem uma frequência de 20 kHz e a frequência de amostragem é de 500 kHz, garante-se que o sinal é amostrado sem a ocorrência de erros. Linha de código onde esta configuração é efectuada:

- `OSCCON = 0b00110010; //500 kHz`



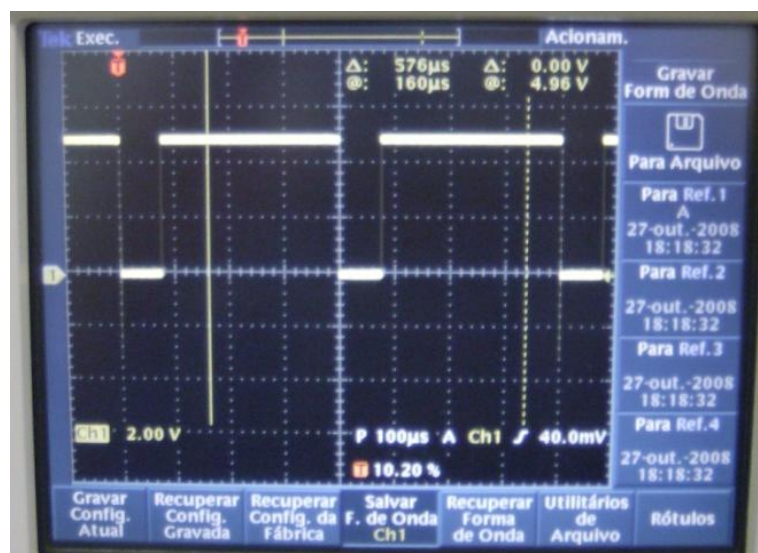
O duty-cycle deve estar limitado para que não ocorra uma saturação. Assim no código de programação da PIC foi colocado o seguinte limitador:

- if (dutyCycle > 200)  
    {  
        dutyCycle = 200;  
    }

No caso da ocorrência de uma alteração das variáveis de entrada, o duty-cycle é alterado conforme a seja a relação entre as variáveis de entrada.

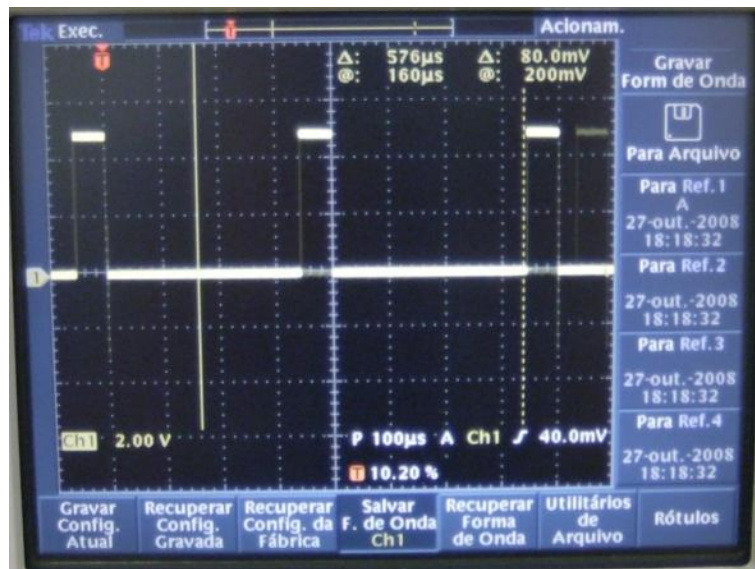
No caso de  $\frac{\Delta I}{I} > \frac{\Delta V}{V}$ , o duty-cycle aumenta, até atingir o ponto de máxima potência, como se pode verificar na fotografia seguinte.

Para efectuar o teste, faz-se variar uma das variáveis de entrada de forma que o duty-cycle seja alterado. Depois igualam-se novamente as variáveis de entrada, o que faz com que o duty-cycle estabilize, pois teoricamente foi encontrado o ponto de potência máxima.



**Figura 5.2:** Visualização no osciloscópio do duty-cycle depois de aumentado

Quando  $\frac{\Delta I}{I} < \frac{\Delta V}{V}$ , ocorre exactamente o contrário, ou seja, o duty-cycle diminui até ser alcançado o ponto de potência máxima.



**Figura 5.3:** Visualização no osciloscópio do duty-cycle depois de reduzido

## Custos

São necessários poucos componentes para fazer a implementação prática do algoritmo MPPT.

Na tabela 5.1 estão os custos associados à implementação do algoritmo MPPT.

Componente	Descrição	Quantidade	Preço
Microcontrolador	PIC18F4620	1	4,50 €
Potenciômetros	Trimmer 4K7	3	1,49 €
LED	Basic LED - Red	2	0,50 €
Display	Basic 16x2 LCD	1	11,95 €
Total			18,44 €

**Tabela 5.1:** Custo dos componentes utilizados para implementar o algoritmo MPPT

## Capítulo 6 - Conclusões

---

Ao longo desta dissertação foi abordado todo o processo que envolve a transferência de energia retirada de painéis solares fotovoltaicos para a rede eléctrica. Primeiramente foram apresentadas várias configurações e esquemas utilizados nos sistemas de conversão fotovoltaica, foi assim possível compreender que a escolha da configuração depende da finalidade que o utilizador pretender.

Depois foram apresentados e analisados vários tipos de conversores DC-DC que normalmente estão associados a este tipo de conversão de energia, concluindo-se que o conversor DC-DC Boost é o que mais se adequa para a realização deste projecto. Este é um conversor apresenta na sua saída uma tensão superior à tensão que está na entrada, o que é fundamental neste caso em concreto pois a tensão máxima do painel é relativamente baixa (44,8 V).

Para entender melhor o funcionamento de um painel fotovoltaico foi utilizado um circuito equivalente que se comporta de uma forma semelhante. A partir da equação do circuito equivalente foi criado um modelo de simulação em MatLab/Simulink que permitiu observar o comportamento do painel, bem como traçar as curvas I-V e P-V para diversos valores de temperatura e radiação solar. Verifica-se que existe uma alteração considerável das curvas características perante variações das condições exteriores, sendo portanto imprescindível o uso de um eficiente algoritmo de busca do ponto de potência máxima.

Foram exibidos alguns métodos de procura do ponto ideal de funcionamento, para permitir uma melhor compreensão deste tipo de algoritmos. Um novo método MPPT foi apresentado, baseado apenas na leitura instantânea dos valores de corrente e tensão extraídos do painel.

Todo o sistema de conversão foi descrito e analisado, desde o painel fotovoltaico até à ligação com a rede eléctrica. Foram efectuadas simulações dos vários módulos do sistema para melhor demonstrar o seu funcionamento, e verificou-se que cumpre os objectivos propostos.

Por fim foram realizados alguns testes em laboratório. Foi efectuado o teste do algoritmo de busca MPPT, mas de forma isolada pois não foi possível realizar testes a todo o sistema interligado. De qualquer dos modos comprovou-se que o algoritmo efectua o pretendido e que se estivesse ligado com o sistema de conversão, com certeza cumpriria o objectivo desejado.

Por tudo o que foi referido anteriormente, pode-se dizer que este projecto permitiu uma aprendizagem mais aprofundada na área dos sistemas de conversão de energia fotovoltaica. Esta é uma área que está em constante desenvolvimento, pois apesar de ser fonte de energia inesgotável, ainda é pouco competitiva, em termos de rendimento e custo, com outras formas de energia.

## **Trabalhos Futuros**

O trabalho realizado para esta dissertação é apenas uma parte do estudo e desenvolvimento que pode ser feito. Para trabalhos futuros, seria interessante utilizar na prática o algoritmo desenvolvido neste projecto, integrado num sistema real de conversão de energia e verificar a sua aplicação.

Seria também interessante implementar um sistema que permitisse a visualização dos valores instantâneos da potência debitada pelo painel.

## Bibliografia

---

- [1] F. Chimento, S. Musumeci, A. Raciti, C. Sapuppo and M. Di Guardo. "A Control Algorithm for Power Converters in the Field of Photovoltaic Applications". European Conference on Power Electronics and Applications, 2007.
- [2] Junzo Kida, Kazuhito Tokuda Yoshiyuki Ishihara and Toshiyuki Todaka. "Analysis of DC-DC Converter for The Maximum Power Point Control of Photovoltaic". 13<sup>th</sup> International Telecommunications Energy Conference, 1991.
- [3] Hiren Patel and Vivek Agarwal. "Maximum Power Point Tracking Scheme for PV Systems Operating Under Partially Shaded Conditions". IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 4, April 2008.
- [4] Rashid, Muhammad H. "Power Electronics Handbook", 2001.
- [5] Tom Markvart and Luis Castañer. "Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and applications", 2003.
- [6] Frazão, Jorge. Orientador Prof. Stanimir Valtchev. "Inversor CC-CA Síncrono com a Rede Pública para Paineis Fotovoltaicos". Instituto Superior de Transportes.
- [7] C. Cabal, C. Alonsol, A. Cid-Pastor, B. Estibals, L. Seguiel, R. Leyva G. Schweitz, J. Alzieu. "Adaptive digital MPPT control for photovoltaic applications". IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2007.
- [8] R. Leyva, C. Alonso, I. Queinnec, A. Cid-Pastor, D. Lagrange, L. Martínez-Salamero. "MPPT of Photovoltaic Systems using Extremum-Seeking Control". IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2006.
- [9] N. Mohan, T. M. Undelan, and W. P. Robbins, Power Electronics – Converters, Applications and Design, Third Edition ed.: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [10] Todd, Philip C., "UC3854 Controlled Power Factor Correction Circuit Design", Texas Instruments Incorporated, 1999.
- [11] Soeren Baekhoej Kjaer, John K. Pedersen, Frede Blaabjerg. "A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 41, No. 5, September/October 2005.
- [12] Ting-Chung Yu, Tang-Shiuan Chien. "Analysis and Simulation of Characteristics and Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Systems". PEDS2009.
- [13] Trishan Eswam and Patrick L. Chapman. "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques". IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 22, No. 2, June 2007.

- [14] S. Jain and V. Agarwal. "Comparison of the performance of maximum power point tracking schemes applied to single-stage grid-connected photovoltaic systems". IET Electr. Power Appl., Vol. 1, No. 5, September 2007.
- [15] Wuidart, L. "Topologies for Switched Mode Power Supplies". STMicroelectronics, 1999.
- [16] Syafrudin Masri and Pui-Weng Chan, "Development of a Microcontroller-Based Boost Converter for Photovoltaic System", European Journal of Scientific Research, 2010.
- [17] Martina Calais, Johanna Myrzik, Ted Spooner, Vassilios G. Agelidis. "Inverters for Single-phase Grid Connected Photovoltaic Systems - An Overview", 2000.
- [18] Texas Instruments, Unitrode. UC3854 Datasheet.
- [19] Erickson, Robert W. "DC-DC Power Converters". Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering.
- [20] Alessandro Ingegnoli, Antonio Iannopollo. "A Maximum Power Point Tracking Algorithm for Stand-Alone Photovoltaic Systems Controlled by Low Computational Power Devices". 15<sup>th</sup> IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, 2010.
- [21] Frede Blaabjerg, Remus Teodorescu, Zhe Chen and Marco Liserre. "Power Converters and Control of Renewable Energy Systems".
- [22] Fritz Schimpf, Lars E. Norum. "Grid connected Converters for Photovoltaic, State of the Art, Ideas for Improvement of Transformerless Inverters". Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, June 9-11, 2008.
- [23] Microchip. PIC18F2525/2620/4525/4620 Data Sheet.
- [24] Microchip. MPLAB C18 C Compiler Libraries, 2005.
- [25] Dusan Graovac, Marco Purchel, Andreas Kiep. "Mosfet power losses calculation using the data-sheet parameters". Infineon, Application Note, V 1.1, July 2006.
- [26] Kimiyoshi Kobayashi, Hirofumi Matsou, Fellow, IEEE, Yutaka Sekine. "An Excellent Operating Point Tracker of the Solar-Cell Power Supply Sistem". IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 53, No. 2, April 2006.
- [27] H. S. H. Chung, K. K. Tse, S. Y. Ron Hui, C. M. Mok and M. T. Ho, "A novel maximum power point tracking technique for solar panels using a Sepic or Cuk converter". Ieee Transactions On Power Electronics, Vol. 18, No. 3, May 2003.

- [28] Krein, Philip T., "Ripple Correlation Control, With Some Applications". IEEE 1999.
- [29] B. S. Prasad, S. Jain and V. Agarwall, "Universal single-stage grid-connected inverter". IEEE transactions on energy conversion, vol. 23, no. 1, March 2008.
- [30] M. Liserre, F. Blaabjerg, R. Teodurescu and Z. C. Aalborg, "Power Converters and Control of Renewable Energy Systems". 6-th International Conference on Power Electronics, 2004.
- [31] CEEETA – Centro de Estudos em Economia da Energia dos Transportes e do Ambiente, "Tecnologias de Micro-Geração e Sistemas Periféricos". Dezembro 2001.
- [32] Huan-Liang Tsai, Ci-Siang Tu, Yi-Jie Su, "Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK". WCECS 2008.
- [33] Anca D. Hansen, Poul Sorensen, Lars H. Hansen, Henrik Bindner. "Models for a Stand-Alone PV System". Riso National Laboratory, Roskilde, December 2000.





## Anexo - Código de programação da PIC

---

```
#include <adc.h>
#include <delays.h>
#include <p18f4620.h>
#include <usart.h>
#include <pwm.h>
#include <timers.h>
#include <stdio.h>
#include "LCD.h"
```

```
#pragma config OSC = INTIO7 //Internal oscillator
#pragma config FCMEN = OFF
#pragma config IESO = OFF
#pragma config PWRT = ON
#pragma config BOREN = OFF
#pragma config WDT = OFF
#pragma config MCLRE = OFF //MCLR is disabled
#pragma config PBADEN = OFF
#pragma config LVP = OFF
```

```
int analog1, analog2, temp1, temp2, temp3, temp4, flag=0;
int dutycycle = 100;
```

```
void _user_putc(unsigned char c)
{
```

```

        send_data(c); //Send character to LCD
    }

void main(){

    const rom char *condition;

    if (flag == 0)
    {
        OSCCON = 0b00110010; //500 kHz
        TRISD = 0x00; //PORTD is all output
        lcd_init(); //Initialize the LCD
        send_cmd(0x0C); //Turn off cursor
        stdout = _H_USER; //Set to user-defined output stream via _user_putc
    }
    TRISB = 0x00;

    OpenADC(ADC_FOSC_8 & ADC_RIGHT_JUST & ADC_0_TAD,
    ADC_CH0 & ADC_INT_OFF & ADC_VREFPLUS_VDD & ADC_VREFMINUS_VSS,
    0b1011);

    SetChanADC(ADC_CH0);
    Delay10TCYx( 50 );
    ConvertADC(); // Start conversion

    while( BusyADC() ); // Wait for ADC conversion
    temp1 = ReadADC(); // Read result and put in temp1

```

```

SetChanADC(ADC_CH1);
Delay10TCYx( 50 );
ConvertADC(); // Start conversion

```

```

while( BusyADC() ); // Wait for ADC conversion
temp2 = ReadADC(); // Read result and put in temp2

```

```

SetChanADC(ADC_CH2);
Delay10TCYx( 50 );
ConvertADC(); // Start conversion

```

```

while( BusyADC() ); // Wait for ADC conversion
temp3 = ReadADC(); // Read result and put in temp3

```

```

SetChanADC(ADC_CH3);
Delay10TCYx( 50 );
ConvertADC(); // Start conversion

```

```

while( BusyADC() ); // Wait for ADC conversion
temp4 = ReadADC(); // Read result and put in temp4

```

```

analog1 = temp1 >> 5;
analog2 = temp2 >> 5;

```

```

if (analog1 > analog2)
{
    PORTB=0x01;
    OpenTimer2(    TIMER_INT_OFF    &    T2_PS_1_1    &
T2_POST_1_1 );

```

```
OpenPWM1(49);  
dutycycle = dutycycle + 1;
```

```
if (dutycycle > 200)  
{  
    dutycycle = 200;  
}
```

```
SetDCPWM1(dutycycle);  
condition = "I maior que V";
```

```
if (flag != 1)  
{  
    set_cursor(1, 1); //Set cursor to row 1, column 1  
    printf(condition); //Print condition to the LCD  
}  
flag = 1;  
}
```

```
if (analog1 < analog2)  
{  
    PORTB=0x02;  
    T2_POST_1_1 );  
    OpenTimer2(    TIMER_INT_OFF    &    T2_PS_1_1    &  
    OpenPWM1(49);  
    dutycycle = dutycycle - 1;  
  
    if (dutycycle < 0)  
    {  
        dutycycle = 0;
```

```

    }

    SetDCPWM1(dutycycle);
    condition = "V maior que I";

    if (flag != 2)
    {
        set_cursor(1, 1); //Set cursor to row 1, column 1
        printf(condition); //Print condition to the LCD
    }
    flag = 2;
}

if (analog1 == analog2)
{
    PORTB=0x03;
    T2_POST_1_1 );
    OpenTimer2(    TIMER_INT_OFF    &    T2_PS_1_1    &

    OpenPWM1(49);
    SetDCPWM1(dutycycle);
    condition = "Iguais";

    if (flag != 3)
    {
        lcd_init();
        send_cmd(0x0C);
        set_cursor(1, 1); //Set cursor to row 1, column 1
        printf(condition); //Print condition to the LCD
    }
    flag = 3;
}

```

```
}
```

```
CloseADC(); // Disable A/D converter
```

```
}
```